

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

MAIARA KAWANA APARECIDA REZENDE

Evapotranspiração, coeficientes de cultivo simples e dual do milho safrinha para
a região de Dourados-MS

Maringá

2016

MAIARA KAWANA APARECIDA REZENDE

Evapotranspiração, coeficientes de cultivo simples e dual do milho safrinha para
a região de Dourados-MS

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Agronomia do
Departamento de Agronomia, Centro de
Ciências Agrárias da Universidade Estadual de
Maringá, como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Agronomia.

Área de concentração: Produção Vegetal

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio
Lourenço de Freitas

Coorientador: Dr. Danilton Luiz
Flumignan

Maringá

2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

MAIARA KAWANA APARECIDA REZENDE

Evapotranspiração, coeficientes de cultivo simples e dual do milho safrinha para
a região de Dourados-MS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia do Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Paulo Sérgio Lourenço de Freitas
Universidade Estadual de Maringá (Presidente)

Dr. Danilton Luiz Flumignan
Embrapa Agropecuária Oeste

Prof. Dr. Altair Bertonha
Universidade Estadual de Maringá

Aprovada em: 25 fevereiro de 2016.

Local da defesa: Sala 102-A, Bloco J45, *Campus* da Universidade Estadual de Maringá.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, aos meus amados pais, Edilson e Ieda, ao meu irmão Rodrigo, meu sobrinho Murilo, meus avós Moacir e Veronica e a todos que contribuíram para sua realização.

AGRADECIMENTOS

A Deus, criador de tudo, por ter me dado a vida, sabedoria e perseverança para buscar meus objetivos.

A minha família, por sempre estar comigo, me apoiando e encorajando nas minhas decisões. Principalmente aos meus pais, Edilson e Ieda, pela minha educação e pelo incentivo para que eu concluísse mais esta etapa.

À Universidade Estadual de Maringá (UEM) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PGA) pela oportunidade de realização deste curso de mestrado.

Ao meu orientador, o professor Dr. Paulo Sérgio Lourenço de Freitas e ao meu co orientador Dr. Danilton Luiz Flumignan, por todos os ensinamentos transmitidos, confiança e paciência.

A Embrapa Agropecuária Oeste, por disponibilizar a área, equipamentos, funcionários e tudo o que foi necessário para a realização do presente trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa.

À todos os funcionários da Embrapa Agropecuária Oeste, em especial à toda equipe da Agrometeorologia, Dr. Carlos Ricardo Fietz, Msc Eder, João Cezário, Carlos Henrique, Jaqueline, José Henrique, Gabriela, Carol, Lucas e em especial a Ana Laura que me ajudou muito nos trabalhos a campo.

Agradeço em especial as amizades feitas na Embrapa Agropecuária Oeste, que sempre prestaram apoio e incentivo, Débora, Danilton, Klerisson, Josi, Suelen, Priscila, Stael, Jaque, Fabricia, Guilherme, Laryssa, Henrique, Nath, Dr. Rodrigo Garcia, Dr. Gessi Ceccon.

A todos os professores que contribuíram com a minha formação até hoje.

A todos os funcionários, professores do PGA e do CTI.

Ao professor Dr. Altair Bertonha.

A Liliane Mioto, Anna Paola Tonello, Álvaro Henrique de Souza, Marcelo Lorenzoni, Cássio Seron, Rogério Lavanholi, Fernando André Santos, Jhonatan Monteiro, por prestarem toda solidariedade sempre necessária.

A todos os amigos.

EPÍGRAFE

“Temos o destino que merecemos. O nosso destino está de acordo com os nossos méritos.”

Albert Einstein

BIOGRAFIA

MAIARA KAWANA APARECIDA REZENDE, filha de Edilson Aparecido Rezende e Ieda Daciê Rezende, nascida na cidade de Cianorte, Estado do Paraná, no dia 10 de junho de 1991.

Em 2009 iniciou a graduação no curso de Engenharia Agrícola, pela Universidade Estadual de Maringá (UEM), *campus* do Arenito de Cidade Gaúcha, Estado do Paraná.

Em março de 2014 ingressou no curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Produção Vegetal na Universidade Estadual de Maringá, realizando a pesquisa na Embrapa Agropecuária Oeste, em Dourados, no Estado do Mato Grosso do sul, sob a orientação do Prof. Dr. Paulo Sérgio Lourenço de Freitas e co-orientação do Pesquisador Dr. Danilton Luiz Flumignan.

Evapotranspiração, coeficientes de cultivo simples e dual do milho safrinha para a região de Dourados-MS

RESUMO

A quantificação do consumo de culturas é requerida em estudos de balanço hídrico e em aplicações que visam aumentar a eficiência de uso de água pelos cultivos. A medida dos componentes hidrológicos é de alto custo, particularmente a umidade do solo, evapotranspiração (ET) e percolação. As estimativas de ET e a umidade do solo e a partir de modelos meteorológicos apresentam vantagens pela facilidade de cálculo e a possibilidade de aplicação em diferentes regiões. No entanto, a credibilidade desses métodos de estimativa depende de testes usando medidas de campo, sob o sistema de cultivo predominante. Para que isso ocorra é necessário o conhecimento do consumo hídrico de cada cultura. Logo, esse trabalho foi realizado em condições de campo, na Embrapa – Agropecuária Oeste, Dourados-MS, utilizando lisímetro de pesagem e microlisímetros, com objetivo de determinar a evapotranspiração (ET), e coeficientes de cultivo simples (K_c) e dual, coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo basal (K_{cb}), para a cultura do milho safrinha. A ET foi medida com lisímetro de pesagem cultivado com milho, e com microlisímetros que foram instalados próximo ao lisímetro determinado E, pela diferença foi determinado T. Os valores de K_c , K_e e K_{cb} foram determinados pela razão entre ET, E e T, respectivamente, e a evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelo método Penman-Monteith. Os valores de ET_c do milho safrinha cultivado na região de Dourados-MS foram diretamente influenciados pela área foliar, de modo que os valores mais elevados ocorreram de 28 a 97 dias após a semeadura, apresentando consumo total de 362,5 mm durante o ciclo de 140 dias. Os valores recomendados de K_c neste trabalho são: $K_{c\text{ ini}}$ de 0,5; $K_{c\text{ mid}}$ de 1,2; $K_{c\text{ end}}$ de 0,47. Já os valores de K_e são: $K_{e\text{ ini}}$ de 0,42; $K_{e\text{ mid}}$ de 0,27; $K_{e\text{ end}}$ de 0,55. E os valores de K_{cb} são: 0,1; 0,9 e 0,1 para as fases inicial, média e final, respectivamente. Observou-se que os valores medidos na fase inicial e final da cultura para a região são maiores que os valores fornecidos pelo Boletim FAO 56, o que justifica a utilização destes, uma vez que os valores fornecidos pela FAO subestimam a realidade.

Palavras-Chave: Lisímetro. Microlisímetro. Evaporação. Transpiração. *Zea mays* L.

Determination of evapotranspiration, simple crop coefficients and dual off-season corn in the region of Dourados-MS

ABSTRACT

Quantification of crop consumption is required in water balance studies and applications aimed at increasing water use efficiency by crops. Measurement of hydrological components is costly, particularly soil moisture, evapotranspiration (ET) and percolation. The estimates ET and soil moisture and from meteorological models have advantages for ease of calculation and the possibility of applying in different regions. However, the credibility of these estimation methods depends tests using field measurements under the prevailing culture system. For this to happen it is necessary to know the water consumption of each crop. Soon this work was carried out under field conditions at Embrapa – Agropecuária Oeste, Dourados-MS, using lysimeter weighing and microlysimeters, in order to determine evapotranspiration (ET), and simple crop coefficients (K_c) and dual coefficient evaporation (K_e) and basal cultivation coefficient (K_{cb}) to the second corn crop. The ET was measured by weighing lysimeter planted with corn, and microlysimeters that were installed near the determined lysimeter. The difference was determined T. The values of K_c , K_e and K_{cb} were determined by the ratio of ET, E and T, respectively and the reference evapotranspiration (ET_0) estimated by Penman-Monteith method. The values of ET_c the second crop of corn grown in the Dourados-MS region are directly influenced by the leaf area, so that the highest values occur in 28 to 97 days after sowing, with total consumption of 362.5 mm during the cycle 140 dias. Os recommended values of K_c in this work are: $K_{c\ ini}$ 0.5; $K_{c\ mid}$ 1.2; $K_{c\ end}$ 0.47. Already K_e values are: $K_{e\ ini}$ 0.42; $K_{e\ mid}$ 0.27; $K_{e\ end}$ 0.55. And K_{cb} values are: 0.1; 0.9 and 0.1 for initial, middle and final, respectively. It was observed that the values measured in the initial and final stage of the crop for the region are greater than the values provided by FAO Bulletin 56, which justifies the use of these, since the values provided by FAO underestimate the reality.

Keywords: Lysimeter. Microlysimeter. Evaporation. Transpiration. *Zea mays* L.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores da Constante do denominador (C_d) e Constante do numerador (C_n), segundo ASCE-EWRI (2005), para a utilização da equação 1.1, em função do método e da Radiação horária líquida na superfície.	12
Tabela 2. Análises químicas e físicas do solo.	18
Tabela 3. Equipamentos existentes na Estação Agrometeorológica da Embrapa Agropecuária Oeste em Dourados, Mato Grosso do Sul	19
Tabela 4. Duração das fases (dias) do milho safrinha determinado pelo lisímetro (Medido) e de acordo com o Boletim 56 da FAO (FAO)	39
Tabela 5. Coeficientes de cultivo (K_c) do milho safrinha determinado pelo lisímetro (Medido) e modelado de acordo com o Boletim 56 da FAO (FAO).....	42
Tabela 6. Coeficientes de evaporação do solo (K_e) determinado pelos ML (Medido) e modelado de acordo com o Boletim 56 da FAO (FAO)	49
Tabela 7. Coeficientes de cultivo basal (K_{cb}) determinado pela diferença entre o K_c do lisímetro e K_e dos ML (Medido) e modelado de acordo com o Boletim 56 da FAO (FAO)	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação climática do Estado de Mato Grosso do Sul. Aw significa tropical de savanas, Am tropical monçônico e Cfa temperado úmido com verão quente.....	15
Figura 2. Médias mensais da precipitação (A) e temperatura (B) na região de Dourados, Mato Grosso do Sul durante o período de 1980 a 2012 (33 anos).....	16
Figura 3. Croqui da Estação Agrometeorológica da Embrapa Agropecuária Oeste localizada em Dourados, Mato Grosso do Sul (latitude 22°16'S, longitude 54°49'O e altitude de 408 m). Cotas em metros.....	20
Figura 4. Croqui da área experimental. O retângulo central representa o lisímetro de pesagem e as circunferências representam os microlisímetros. Cotas em metros e desenho na escala 1:500.	21
Figura 5. Croqui da área experimental e de seu entorno. Nele nota-se a área “5B” na qual o lisímetro se encontrava instalado e onde foi realizado o experimento.	22
Figura 6. Implantação do experimento (05/03/2015). (A) Semeadura mecanizada do milho; (B) Semeadura manual do milho no interior e proximidades do lisímetro; (C) Área próxima ao lisímetro após a semeadura.....	23
Figura 7. Cultivo do milho safrinha irrigado por sistema de aspersão fixo.	24
Figura 8. Lisímetro de pesagem na área experimental. (A) Estrutura em alvenaria para instalação do lisímetro; (B) Lisímetro em aço carbono; (C) Estrutura em alvenaria para suporte do lisímetro, com pilares em concreto e instalação elétrica pronta; (D) Lisímetro de pesagem devidamente instalado e sendo cultivado.....	25
Figura 9. Sistema de aquisição e armazenamento de dados do lisímetro. (A) Datalogger instalado no fosso subterrâneo do lisímetro; (B) Aquisição de dados do lisímetro utilizando notebook.	26
Figura 10. Componentes do ML; (A) envoltório externo; (B) ML; (C) CAP para isolar a parte inferior do ML.	27
Figura 11. Componentes do amostrador de microlisímetro. (A) Cilindro de corte; (B) Base que recebe os golpes; (C) Peso de 10 Kg para os golpes; (D) Cilindro com a haste usada para retirar o cilindro cravado no solo.....	28
Figura 12. Instalação dos microlisímetros na área experimental. (A) Golpes para extração da	

amostra; (B) Retirada do microlisímetro de modo a permanecer o perfil interno do solo de maneira intacta; (C) Microlisímetro com o CAP instalado; (D) ML devidamente instalado para uso.....	29
Figura 13. Mensuração da área foliar. (A) Mensuração do comprimento; (B) mensuração da largura máxima.	33
Figura 14. Colheita realizada dia 23/07/2015, manualmente, nos blocos amostrados e no lisímetro.	35
Figura 15. Processo para determinação da umidade de colheita do milho. (A) Trilhadeira; (B) pesagem da amostra em balança digital; (C) Medidor de umidade de grãos.	36
Figura 16. Índice de área foliar (IAF), adimensional, do milho safrinha medido em diferentes períodos durante o ciclo.....	38
Figura 17. Valores diários de evapotranspiração de referência (ET ₀) e evapotranspiração da cultura (ET _c) do milho safrinha durante todo o ciclo.....	40
Figura 18. Coeficientes de cultivo simples (K _c) e índice de área foliar (IAF) do milho safrinha.	42
Figura 19. Coeficiente de cultivo (K _c) do milho safrinha modelado com os valores de K _c constantes no Boletim 56 da FAO (FAO) e modelado com os valores medidos pelo lisímetro (Lisímetro).....	43
Figura 20. Evapotranspiração de referência (ET _o), evapotranspiração da cultura (ET _c), evaporação (E) e transpiração (T) (todos em mm dia ⁻¹), medidos no período de 140 dias de ciclo do milho safrinha para a região de Dourados - MS.	46
Figura 21. Evapotranspiração de referência (ET _o), evapotranspiração da cultura (ET _c), evaporação (E) e transpiração (T) (todos em mm d ⁻¹), do milho safrinha medidos com lisímetro de pesagem e microlisímetros nos dias 10 e 11 de março de 2015 (Série 1)...47	47
Figura 22. Evapotranspiração de referência (ET _o), evapotranspiração da cultura (ET _c), evaporação (E) e transpiração (T) (todos em mm d ⁻¹), do milho safrinha medidos com lisímetro de pesagem e microlisímetros no período de 09 a 11 de abril de 2015 (Série 2).	48
Figura 23. Coeficientes de cultivo simples (K _c), coeficiente de evaporação (K _e) e coeficiente de cultivo basal (K _{cb}) do milho safrinha.....	49
Figura 24. Coeficiente de evaporação do solo (K _e) do milho safrinha modelado com os valores obtidos pelos ML (ML) e com os valores do Boletim 56 da FAO (FAO).....	50
Figura 25 . Coeficiente de cultivo basal (K _{cb}) do milho safrinha modelado com os valores	

obtidos pelo lisímetro e ML (ML) e com os valores do Boletim 56 da FAO (FAO).....	52
Figura 26. Produtividade do milho safrinha para as condições do estudo na área externa ao lisímetro de pesagem (Blocos) e na área interna do lisímetro (Lisímetro).....	53
Figura 27. Relação entre o coeficiente de cultivo (K_c) do milho safrinha para a região de Dourados - MS e o índice de área foliar (IAF).....	54
Figura 28. Relação entre o coeficiente de evaporação do solo (K_e) para o milho safrinha cultivado na região de Dourados - MS e o índice de área foliar (IAF).	54
Figura 29. Relação entre o coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) do milho safrinha para a região de Dourados - MS e o índice de área foliar (IAF).	55

SUMÁRIO

Página

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Milho	3
2.1.1 Panorama atual do milho safrinha	3
2.1.2 Características do milho	3
2.1.3 Fenologia do Milho	4
2.1.4 Exigências Climáticas da Cultura do Milho	5
2.2 Evapotranspiração	6
2.2.1 Determinação de evapotranspiração	7
2.3 Evaporação	8
2.3.1 Métodos de determinação de evaporação do solo	9
2.4 Transpiração	10
2.4.1 Determinação da transpiração	10
2.5 Evapotranspiração de Referência (ET_0)	11
2.6 Coeficiente da cultura (K_c)	12
2.7 Coeficiente de cultura basal (K_{cb}) e Coeficiente de evaporação do solo (K_e)	13
3 MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 Localização e Clima	15
3.2 O solo.....	17
3.3 Estação agrometeorológica.....	19
3.4 Área experimental.....	20
3.5 Implantação do experimento com milho safrinha	22
3.6 Irrigação.....	23
3.7 Lisímetro de pesagem e medição da evapotranspiração.....	24
3.8 Microlisímetros.....	26
3.9 Determinação da transpiração	30
3.10 Determinação dos valores de K_c , K_e e K_{cb}	30
3.11 Modelagem dos valores de K_c , K_e e K_{cb}	31

3.12 Índice de área foliar	32
3.13 Duração das fases	33
3.14 Colheita e determinação da produtividade	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Índice de área foliar	38
4.2 Duração das fases durante o ciclo.....	39
4.3 Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do milho safrinha	39
4.3.1 Evapotranspiração da cultura.....	39
4.3.2 Coeficiente de Cultivo	41
4.4 Evaporação, Transpiração e coeficientes de cultivo dual (K_e e K_{cb}).....	45
4.4.1 Evaporação e Transpiração.....	45
4.5 Coeficiente de evaporação do solo e Coeficiente de cultivo basal.....	48
4.5.1 Produtividade.....	52
4.5.2 Determinação do K_c , K_e e K_{cb} utilizando do IAF	53
5 CONCLUSÕES	56
6 REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial à vida, ao desenvolvimento econômico e ao bem-estar social. Mesmo encontrada em abundância em território nacional, já apresenta comprometimento em relação à qualidade e quantidade, podendo este ser ainda maior próximo aos grandes centros (MEDEIROS et al., 2005).

A produção agrícola é dependente de vários fatores, mas normalmente o fator água é considerado o mais limitante (PAIVA et al., 2005; FLEXAS et al., 2006). De toda a vazão captada nos corpos hídricos do Brasil ($986,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), 69% é utilizado na irrigação (ANA, 2010). Assim sendo, é de fundamental importância o uso racional deste recurso na irrigação, tendo como base o conhecimento da sua exigência pelas culturas, quantificada pela evapotranspiração.

A produção agrícola no Estado do Mato Grosso do Sul está concentrada principalmente em lavouras de soja e milho safrinha cultivados sob sequeiro, embora a área irrigada tenha aumentado nos últimos anos. Para ambos os modelos de produção, conhecer o consumo hídrico das culturas é importante para o sucesso da atividade.

A determinação desse consumo hídrico consiste em uma tarefa relativamente complexa. Nesse sentido, o uso da lisimetria de pesagem constitui uma ferramenta importante, pois é capaz de fornecer dados precisos em um pequeno intervalo de tempo (QUAGLIA, 2005)

Conforme Allen et al. (1998), a transferência de água das plantas para a atmosfera por meio da transpiração (T), somada a evaporação da água do solo (E), é denominada por evapotranspiração (ET). Essa evapotranspiração pode ser de culturas específicas, como o milho safrinha, e denominada evapotranspiração da cultura (ET_c) ou de uma cultura de referência, caso do gramado das estações meteorológicas, e denominado de evapotranspiração de referência (ET_0).

Desta forma, o coeficiente de cultivo (K_c) se origina da divisão da ET_c pela ET_0 . Considerando que a ET_0 representa a demanda evaporativa da atmosfera, o K_c representa a magnitude com que a cultura analisada atende a essa demanda. Por isso, valores de K_c são requeridos em atividades como: análises de balanço hídrico, irrigação, uso eficiente da água na agricultura, zoneamento agroclimático, entre outros. Desta forma, a determinação de valores precisos de K_c para as diferentes culturas é importante e a maneira mais recomendada

para tal é relacionar ET_c medida por lisímetros de pesagem com ET_0 estimada com dados de estações meteorológicas pelo método Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

O K_c pode ser dividido em coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) e coeficiente de evaporação do solo (K_e). O K_{cb} é determinado através da razão entre a transpiração das plantas (T) e a ET_0 , e o K_e , por sua vez, trata-se da razão entre a evaporação do solo (E) e a ET_0 . Estes coeficientes representam separadamente as transferências de água do sistema produtivo pela planta e pelo solo diante da demanda atmosférica imposta pelo ambiente (ALLEN et al., 1998).

Sendo assim, o objetivo do trabalho foi determinar as taxas de ET , E e T do milho safrinha cultivado na região de Dourados-MS e, a partir destes, por meio da correlação com a dinâmica da ET_0 , determinar os valores de K_c , K_e e K_{cb} .

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Milho

2.1.1 Panorama atual do milho safrinha

Produzido em grande parte do continente americano, a cultura do milho é de suma importância econômica e intensa utilização. Sua utilização varia desde o consumo em grão, alimentação animal, até a indústria de processamento de elevada tecnologia (PAES, 2008).

Os Estados Unidos, China e Brasil, destacam-se como os maiores produtores, contudo, como principais exportadores tem-se os Estados Unidos, Argentina e Brasil (GARCIA et al., 2008).

A produção brasileira de milho se baseia em duas safras conduzidas em duas épocas de plantio distintas, sendo designado como milho primeira safra e milho segunda safra, ou, milho verão e milho safrinha, respectivamente. A safrinha se caracteriza pelo milho plantado sob sequeiro, na maioria dos casos em sucessão a soja (GARCIA et al., 2008).

Com diferentes sistemas de cultivos, o milho safrinha é produzido principalmente no Centro-Oeste, Sudeste e Sul brasileiro (MAPA, 2015).

No Estado do Mato Grosso do Sul a produção de milho safrinha é normalmente estabelecida em sucessão a cultura de verão, nesse caso a soja (FLORES, 2013). Por isso, o milho safrinha é semeado entre meados de fevereiro e o primeiro decêndio de março, pois deve-se evitar o plantio tardio devido a menor disponibilidade hídrica, radiação solar e quedas bruscas de temperatura nos meses de inverno, o que implica na ocorrência de geadas.

2.1.2 Características do milho

O milho (*Zea mays* L.) pertence à família *Poaceae* e à tribo *Andropogoneae* (FIGUEIRA, 2007). Originário nas Américas, com elevada importância e completamente domesticado, destaca-se como a gramínea que possui maior eficiência na produção de grãos (MANGELSDORF, 1986).

O processo de domesticação e seleção natural, trouxe como resultado, uma planta ereta e robusta, de ciclo anual, com a altura variando de um a quatro metros e destinada à produção de grãos (MAGALHÃES et al., 2002).

De fácil adaptação aos diferentes sistemas de produção e grande versatilidade, a cultura do milho é uma opção viável para os sistemas de rotação de culturas, sendo capaz de produzir elevada quantidade de fitomassa com alta relação carbono/nitrogênio (CRUZ et al., 2006).

No nível de produção comercial, atualmente em vigor no Mato Grosso do Sul tem-se trabalhado normalmente com materiais genéticos Bt (híbridos tolerantes a insetos lepidópteros). Híbridos simples, de ciclo super precoce tem sido mais utilizados diante da preocupação em realizar a colheita antes de possíveis ocorrências de geadas.

2.1.3 Fenologia do Milho

De maneira geral, as plantas de milho seguem um padrão de desenvolvimento, contudo, de acordo com características como, híbrido utilizado, local e data de plantio, é possível que existam variações no tempo entre os estádios fenológicos e no número de folhas (MAGALHÃES; DURÃES, 2008).

A planta segue um desenvolvimento, de modo que a ordem da sucessão de fases é irreversível. O sistema de identificação de uma planta de milho é dividido em vegetativo (V) e reprodutivo (R) (FASSIO et al., 1998).

A germinação e emergência são classificadas como estágio vegetativo. Entende-se por germinação, o momento em que a semente absorve água, até, a emergência da radícula. A emergência, por sua vez, compreende da emergência da radícula, até, a emissão do coleóptilo sobre a superfície do solo (MAGALHÃES; DURÃES, 2008).

O estágio vegetativo é ainda subdividido de forma numérica, de acordo com a formação visível na inserção da bainha da folha com o colmo, iniciando no estágio V1 até V(n), onde (n) é representado pela última folha emitida antes do pendoamento da planta, sendo finalizado pelo estágio VT, ou ainda, pendoamento (MAGALHÃES; DURÃES, 2008; BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2009). Esse sistema de descrição fenológica é semelhante ao utilizado por Ritchie et al. (1993).

O pendoamento tem seu início a partir do momento em que o último ramo do pendão esteja completamente emergido. A variação do tempo entre o estágio VT e estágio de

embonecamento e polinização (R1) é dependente do híbrido utilizado, além das condições ambientais do local. Trata-se de uma fase muito vulnerável às intempéries da natureza. Nesse tocante, sabe-se que o excesso de água contribui com a inviabilidade dos grãos de pólen, entretanto, a seca também interfere no sincronismo pendão-espiga, de modo que materiais prolíficos reduzem a possibilidade de uma segunda espiga (MAGALHÃES, 2003).

O estágio reprodutivo está subdividido de R1 a R6, onde, R1 é o embonecamento; R2 é caracterizado pelo grão com aspectos bolha d'água; R3 o grão leitoso; R4 o grão pastoso; R5 a formação de dente, ocasião em que se tem o aparecimento de uma concavidade na parte superior do grão, e R6 é a partir do momento que os grãos obtêm o máximo de peso seco e vigor (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2009).

2.1.4 Exigências Climáticas da Cultura do Milho

O período vegetativo (crescimento e desenvolvimento) da cultura do milho se relaciona com fatores climáticos, tais como, a disponibilidade hídrica, radiação solar e temperatura. A cultura tem grande exigência desses fatores, necessitando de níveis ótimos para que se obtenha bom potencial genético de produção (PEREIRA FILHO; CRUZ, 2003).

Segundo Fancelli (2003), o milho é uma das plantas com maior eficiência na conversão de energia radiante e produção de biomassa. Essa maior eficiência está relacionada à anatomia das plantas que possuem menor área entre as nervuras e lamela suberizada, que previne a perda de CO₂ para o meio (HATTERSLEY, 1984, apud, BERGAMASCHI; HOMERO, 2014).

A eficiência de uso da radiação solar é representada através da razão entre a energia fixada na forma de biomassa das plantas e a energia incidente sobre o dossel, ou seja, representando a eficiência da planta na conversão da radiação solar por meio dos processos da fotossíntese. Conforme o aumento do dossel das plantas, aumenta-se a eficiência de interceptação da radiação solar, consequentemente aumenta-se a eficiência de uso da radiação. O valor máximo é atingido na fase de desenvolvimento da cultura, quando se têm o maior valor de índice de área foliar (IAF), de modo que a cultura é capaz de interceptar o máximo de energia, e esse valor diminui ao final do ciclo com a senescência foliar e a diminuição da atividade fotossintética (MÜLLER; BERGAMASCHI, 2005).

A temperatura, durante todas as fases fenológicas, é um dos fatores primordiais que afetam o desenvolvimento da cultura (LYRA et al., 2008). Pereira Filho e Cruz (2003)

afirmam que os níveis ótimos de temperatura são variáveis de acordo com o estágio fenológico em que a cultura se encontra e, ressaltam que a temperatura da planta é muito próxima da temperatura do ambiente, logo alterações bruscas interferem diretamente nos processos metabólicos da planta. Porém, Campbell e Norman (1998), ressaltam que o estado hídrico das plantas pode implicar em sensíveis modificações, de modo que, por exemplo, plantas sob déficit hídrico, por terem taxas transpiratórias reduzidas, tendem a se aquecer mais.

Nesse tocante, a questão hídrica também é de suma importância para a cultura do milho, de modo que o déficit hídrico tende a diminuir o crescimento vegetativo, promovendo redução da condutância estomática com o fechamento dos estômatos, enrolamento das folhas, reduzindo o IAF, produção de matéria seca, e por consequência necessita-se de maior quantidade de graus dias para completar o ciclo (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014). Durante o florescimento, a combinação de déficit hídrico e elevadas temperaturas interferem na polinização e na formação inicial dos grãos, resultando portanto na diminuição do número de grãos por espiga (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993; apud, BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

Em sistemas produtivos com irrigação, acredita-se ser possível a antecipação da safrinha na região sul do Estado do Mato Grosso do Sul, podendo-se realizar a semeadura em meados do mês de janeiro ou início de fevereiro, o que proporcionaria durante o ciclo da cultura maior quantidade de dias com temperaturas elevadas, evitando assim a presença de plantas no campo durante o período de ocorrência de geadas no inverno, o que acarreta em melhores produtividades. As altas temperaturas devem implicar também na aceleração do acúmulo de graus dias o que poderia ajudar a reduzir a duração do ciclo.

2.2 Evapotranspiração

O consumo hídrico de uma cultura corresponde ao fluxo de vapor d'água do sistema solo-planta para a atmosfera, de modo que a quantidade de água armazenada nos tecidos da planta é tão pequena, que é considerada insignificante, sendo o consumo então expresso na forma de ET (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração se constitui de um processo simultâneo de dois fatores, que são a evaporação da água disponível no solo e a transpiração das plantas. Esses processos variam de acordo com o desenvolvimento da cultura, sendo que na fase inicial a maior transferência

de água ocorre por evaporação do solo e à medida que as plantas se desenvolvem e aumentam a área foliar, conseqüentemente, o sombreamento do solo também aumenta, a evaporação se reduz e a transpiração passa a ser dominante. De modo análogo, na ocasião do final do ciclo, ocasião em que ocorre a senescência foliar e menor atividade fisiológica, a evaporação volta a predominar (ALLEN et al., 1998).

As taxas de ET são determinadas por parâmetros meteorológicos, como a velocidade do vento, a radiação solar, a temperatura e umidade do ar. Características da cultura também determinam, por exemplo: tipo de metabolismo, arquitetura foliar, rugosidade do dossel, fase de desenvolvimento e manejo (ALLEN et al., 1998).

Allen et al. (1998) relatam que a ET_0 pode ser descrita como a evapotranspiração de uma superfície hipotética de referência, a qual não sofre restrições hídricas, nem de fertilidade e é conduzida livre de pragas e doenças, ou seja, se encontra em pleno crescimento. Normalmente, em regiões de clima tropical, utiliza-se grama batatais (*Paspalum notatum*) para reproduzir na prática este cultivo hipotético de referência.

A evapotranspiração de cultivo (ET_c) de acordo com Allen et al. (1998); é a evapotranspiração de uma cultura qualquer em que o cultivo esteja livre de doenças, bem fertilizada e ótimas condições de umidade do solo. Para Freitas et al. (2008) a ET_c é o fator que quantifica o consumo hídrico da cultura.

2.2.1 Determinação de evapotranspiração

Existem diversos métodos para a determinação da evapotranspiração, cada qual com suas características (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2005). Segundo, Farahani et al. (2007), a medição da evapotranspiração é onerosa, devido a demanda por equipamentos de alta precisão e custo relativamente elevado, entretanto, métodos diretos e precisos possuem elevada importância, podendo ser utilizado para a comparação e validação de estimativas de ET por métodos indiretos.

Lisímetros de pesagem consistem em tanques, os quais são preenchidos com solo, de modo que o solo deve ser reconstruído no interior do tanque assemelhando-se o máximo possível do solo em condições naturais. No tanque e na bordadura deve ser cultivada a cultura em interesse e o consumo hídrico da cultura é obtido através da variação da massa do lisímetro (ABOUKHALED; ALFARO; SMITH, 1982, PAYERO; IRMAK, 2008; FLUMIGNAN, 2011).

A técnica da lisimetria de pesagem trata essencialmente de um sistema de pesagem que é utilizado para monitorar a variação da massa de um bloco de solo ao qual se encontra disposto em um tanque onde é cultivada a cultura de interesse. Por meio dessa variação de massa é estudado o consumo hídrico das culturas (FLUMIGNAN, 2011).

Segundo Flumignan (2008), os lisímetros tiveram uma grande evolução nos últimos anos, principalmente devido ao avanço da microeletrônica. Porém, Allen et al. (1998), afirmam que devido a obtenção de dados por meio de lisímetros de pesagem ser bastante complexa e onerosa, o uso desse equipamento é justificado apenas em condições experimentais, somente após devida calibração para que os dados obtidos sejam confiáveis.

2.3 Evaporação

A evaporação é o processo de conversão da água do estado líquido para gasoso. São consideradas superfícies evaporantes: lagos, rios, solo, pavimentos (ALLEN et al., 1998).

Para que ocorra o processo de transformação da água do estado líquido para do gasoso, é necessária energia. Essa energia está diretamente relacionada com o saldo de radiação e temperatura do ar (ALLEN et al., 1998).

De acordo com Flumignan (2008), é possível que as maiores taxas de evaporação ocorram em ambientes onde haja alta incidência de radiação, elevadas temperaturas, baixa umidade relativa do ar e grande intensidade de ventos.

Para Brandão (2012), o processo da evaporação do solo é decorrente da energia recebida da radiação solar a qual promove a passagem da água do estado líquido para o gasoso.

Segundo Allen et al. (1998), quando a superfície evaporante em questão é o solo, outros fatores devem ser observados, como, o dossel da cultura que sombreia o solo e a quantidade de água disponível na superfície do solo. Esses dois fatores controlam a evaporação do solo, de modo que quando é disponibilizada água ao solo que possui pouca cobertura ou até mesmo se encontra descoberto, ocorrerão elevados valores de evaporação. O fato se inverte no caso do solo possuir restrições hídricas ou grande quantidade cobertura vegetal.

A água é disponível nas formas de chuvas e irrigação. Quando a superfície do solo se encontra com elevado teor de água, a evaporação é alta e é controlada por questões meteorológicas. Já, quando a frequência da disponibilização de água para o solo diminui,

consequentemente, o teor de umidade da superfície também é reduzido, a água presente nas camadas inferiores tende a um fluxo ascendente, porém não sendo capaz de atingir a demanda atmosférica, assim a evaporação passa a ser controlada também pela quantidade de água (ALLEN, et al., 1998).

Para Lemon (1956), o processo de evaporação do solo pode ser dividido em três fases. A primeira fase é caracterizada pela rápida perda de água do solo, onde a quantidade de água é suficiente para suprir a demanda evaporativa do ambiente, influenciada por questões meteorológicas. Na segunda fase do processo evaporativo, a superfície do solo encontra-se com umidade reduzida, sendo necessária a ascensão da umidade das camadas inferiores, logo o fluxo capilar, transferência de vapor, e a combinação dos dois tornam-se os principais controladores dessa fase. Na terceira fase, o processo evaporativo ocorre de maneira extremamente lenta, devido à baixa condutividade hidráulica do solo em direção a superfície, resultado da deficiência de água no solo.

Na agricultura tradicional, a evaporação está presente em maior escala nas fases de preparo e implantação das lavouras. Na fase de germinação das sementes a evaporação é de grande importância, podendo reduzir a disponibilidade de água ao desenvolvimento das plantas. Com o desenvolvimento da cultura, a transpiração se torna maior em relação à evaporação e passa a ser a principal responsável pelo processo de perda de água da área de cultivo para a atmosfera (QUAGLIA, 2005).

2.3.1 Métodos de determinação de evaporação do solo

Diversos estudos relacionados aos componentes da evapotranspiração, balanço hídrico, plantio direto, eficiência no uso da água na agricultura, requerem dados da quantificação da evaporação do solo (FLUMIGNAN, 2008).

Evaporação é a medida fornecida pelo lisímetro de pesagem em situações onde seja solo nu (WALKER, 1983; apud; FLUMIGNAN, 2008). Modelos como o de Ritchie (1972) é usado para estimar a E, quando a T está presente, uma vez que quando ambos os processos estão ativos, não é possível a determinação apenas com lisímetros (FLUMIGNAN, 2008). Como alternativa para separação de valores de E e T dos lisímetros de pesagem, tem-se os microlisímetros (WALKER, 1983; apud; FLUMIGNAN, 2008).

Microlisímetros são pequenos tubos, preenchidos com solo, de modo que as amostras sejam indeformadas, instalados ao nível do solo, e pesados periodicamente para que seja

estimada a evaporação por diferença de massa no período (figura 4) (ALLEN et al., 1998; FLUMIGNAN, 2008; LENA, 2013; VIEIRA, 2013).

A determinação da E, torna-se possível com a utilização de microlisímetros, de modo que a parte inferior deste é vedada e a superfície superior encontra-se sem a presença de plantas, ou seja, a transpiração é nula, sendo a E a única forma de transferência de água nessa situação para a atmosfera (VIEIRA, 2013).

2.4 Transpiração

O processo de transpiração consiste na vaporização da água que se encontra na forma líquida nos tecidos das plantas e na remoção desse vapor para a atmosfera (ALLEN et al., 1998).

Assim como a evaporação, a transpiração também é dependente de fatores meteorológicos, como, a radiação solar, a temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento (ALLEN et al., 1998; MACHADO et al., 2010).

No entanto, fatores intrínsecos às plantas atuam regulando a taxa transpiratória. O principal mecanismo fisiológico que as plantas possuem para o controle da transpiração é a condutância estomática (MESSINGER et al., 2006). Os estômatos possuem células-guarda que regulam sua abertura e fechamento. Quando os estômatos se abrem, ocorre a absorção de CO₂ (fotossíntese) e a perda de água na forma de vapor (transpiração) (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Taiz e Zeiger (2004) afirmam ainda que, a transpiração está diretamente relacionada ao potencial hídrico da planta, ou seja, quando a planta se encontra com elevado potencial hídrico (turgida), promove a abertura dos estômatos e sucessivamente ocorre a transpiração, porém quando o potencial hídrico é baixo tende a ocorrer o fechamento dos estômatos, cessando a transpiração e reduzindo por consequência a taxa fotossintética.

2.4.1 Determinação da transpiração

Vários estudos relacionados à fisiologia, balanço hídrico, componentes da evapotranspiração, uso eficiente da água na agricultura, requerem valores da quantificação da transpiração das culturas (FLUMIGNAN, 2008).

A T pode ser determinada através de sensores que medem o fluxo de seiva pelo xilema do caule (SMITH; ALLEN, 1996), modelos matemáticos e lisímetria (FLUMIGNAN, 2008).

A lisímetria de pesagem aliado ao uso de microlisímetros permite a quantificação da transpiração. Com a variação da massa do lisímetro se mede a evapotranspiração (ET), enquanto com os microlisímetros a evaporação do solo (E), assim por meio de equação simples (Equação 1) é possível estimar a transpiração (T).

$$T = ET - E \quad (1)$$

onde T é a transpiração das plantas, ET é a evapotranspiração da cultura e E a evaporação do solo, todos em mm dia⁻¹.

2.5 Evapotranspiração de Referência (ET₀)

Considerando as condições para a determinação de ET₀, em que os fatores planta e solo não afetam e a água estará sempre disponível, a ET₀ pode ser considerada uma variável climática, haja vista que esta é influenciada somente pelos fatores climáticos. Logo, pode-se comparar ET₀ obtidas em diferentes locais e épocas, por ser a mesma superfície de referência (ALLEN et al., 1998).

Segundo Allen et al. (1998), o método mais preciso para a estimativa de ET₀, que fornece valores em escalas diárias ou horárias é chamado de Penman-Monteith. O método utiliza dados de temperatura, umidade do ar, velocidade do vento, radiação solar.

Para a estimativa de valores a equação é descrita abaixo descrita em ASCE-EWRI (2005):

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{c_n}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma + (1 + c_d u_2)} \quad (2)$$

onde ET₀ é a evapotranspiração de referência estimada pelo método Penman-Monteith diário (mm d⁻¹), Δ é a declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa °C⁻¹), R_n é a radiação líquida na superfície (MJ m⁻² d⁻¹ ou MJ m⁻² h⁻¹), G é o fluxo de calor no

solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ou $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$), γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), C_n é a constante do numerador (Tabela 1), T é a temperatura média do ar medida a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$), u_2 é a velocidade do vento (m s^{-1}), e_s é a tensão de saturação de vapor (kPa), e_a é a tensão parcial de vapor (kPa) e C_d é a constante do denominador (Tabela 1). É importante salientar que os valores de C_n e C_d variam de acordo com a escala de análise, e o C_d varia também de acordo com a R_n .

Tabela 1. Valores da Constante do denominador (C_d) e Constante do numerador (C_n), segundo ASCE-EWRI (2005), para a utilização da equação 1.1, em função do método e da Radiação horária líquida na superfície.

Método para a estimativa de ET_0	C_d	C_n
ET_0 Penman-Monteith diário	0,34	900
ET_0 Penman-Monteith horário $R_n \leq 0$	0,96	37
ET_0 Penman-Monteith horário $R_n > 0$	0,24	37

2.6 Coeficiente da cultura (K_c)

Segundo Allen et al. (1998), o coeficiente da cultura (K_c) é determinado experimentalmente através da relação entre ET_0 e ET_c , logo o K_c pode ser descrito como:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (3)$$

sendo K_c o coeficiente de cultivo simples (adimensional), ET a evapotranspiração da cultura (mm d^{-1}) e ET_0 a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}).

O K_c varia de acordo com a cultura, e este pode ser encontrado em diferentes valores em uma única cultura (VIEIRA, 2013). Segundo Allen et al. (1998), K_c varia de acordo com as características e estádios de desenvolvimento de cada cultura. Segundo o autor o K_c na fase média da cultura possui valores elevados e constantes, porém nas fases inicial e final variam muito diariamente em função da fase da cultura em que tem-se pequena cobertura do solo e, também em função da frequência de umedecimento. De acordo com o autor o K_c possui uma curva, com o formato generalizado, normalmente válido bastante fiável para cultivos anuais.

Com valores de K_c é possível a obtenção da ET_c . Este valor representa o limite máximo de evapotranspiração para o cultivo quando não existem restrições ao crescimento do mesmo devido a limitações hídricas, densidade de cultivo, doenças, pragas, excessiva salinidade (ALLEN et al., 1998; VIEIRA, 2013).

O K_c é requerido em atividades como o manejo de irrigação, estudos de balanço hídrico, uso eficiente da água na agricultura, logo a determinação de valores precisos de K_c é de suma importância, assim, a maneira mais precisa de se determinar K_c é relacionar ET da cultura medida por lisímetros de pesagem com ET_0 estimada pelo método Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

2.7 Coeficiente de cultura basal (K_{cb}) e Coeficiente de evaporação do solo (K_e)

Diferenças na evaporação e transpiração, em locais com a cultura em estudo e a cultura de referência podem ser integrada em um único coeficiente, denominado de coeficiente cultural (K_c). No entanto, este coeficiente pode ser fracionado em dois, o que permite um estudo mais aprofundado, baseado em maior nível de detalhamento. Nesse sentido, o K_c pode ser estudado sob a ótica do coeficiente de cultivo dual que engloba o coeficiente de cultura basal (K_{cb}), devido à transpiração da planta, e coeficiente de evaporação do solo (K_e), relacionado com a evaporação do solo. Logo pode-se entender o coeficiente cultural como, $K_c = K_{cb} + K_e$ (ALLEN et al., 1998).

Trabalhos com coeficiente dual são mais difíceis de serem implementados em relação a trabalhos somente com o K_c . Essa forma de análise somente é mais recomendada quando há a necessidade de informações precisas sobre a influência de valores evaporação e transpiração em dados de K_c (ALLEN et al., 1998).

O coeficiente de cultura basal (K_{cb}) é definido como sendo a razão entre a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração de referência, em condições de superfície do solo seca, porém não há limitação na transpiração. (ALLEN et al., 1998). Segundo Flumignan (2008), como essa condição não ocorre na prática, K_{cb} pode ser entendido como a taxa de transpiração da planta na ausência de déficit hídrico, quando submetida a determinada condição de ET_0 .

Allen et al. (1998) define ainda o coeficiente de evaporação do solo (K_e), como o componente de evaporação da superfície de um solo. É importante salientar que quando há

irrigação ou chuvas frequentes o K_e deve atingir seu valor máximo de modo que à medida que se reduz a umidade nas camadas superficiais tende-se a reduzir os valores de K_e .

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e Clima

O experimento foi conduzido em área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, localizada no município de Dourados, Mato Grosso do Sul. A região está localizada no centro-oeste brasileiro e no sul do Mato Grosso do Sul, com as seguintes coordenadas: 22° 17' de latitude sul, 54° 49' de longitude oeste e 408 metros de altitude em relação ao nível do mar.

O clima na região (Figura 1) é do tipo tropical monçônico ou tropical de monções (Am), segundo a classificação de Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006). Esta região se caracteriza por estar em uma transição entre o clima tropical de savanas (Aw), clima típico do cerrado, e o clima temperado úmido com verão quente (Cfa), clima típico dos estados do sul do Brasil.



Figura 1. Classificação climática do Estado de Mato Grosso do Sul. Aw significa tropical de savanas, Am tropical monçônico e Cfa temperado úmido com verão quente.

De maneira geral, na região o verão é chuvoso e quente, enquanto o inverno é seco e frio (Figura 2). Segundo dados do GUIA CLIMA (2014) referentes ao período de 1980 até 2012 (33 anos), a precipitação média anual é de 1389 mm, sendo dezembro o mês mais chuvoso, com 178 mm, e julho o mais seco, com 44 mm. A temperatura média anual é de 22,5 °C, sendo em julho, mês mais frio, de 18 °C e em dezembro e janeiro, os meses mais quentes, igual a 25,4 °C .

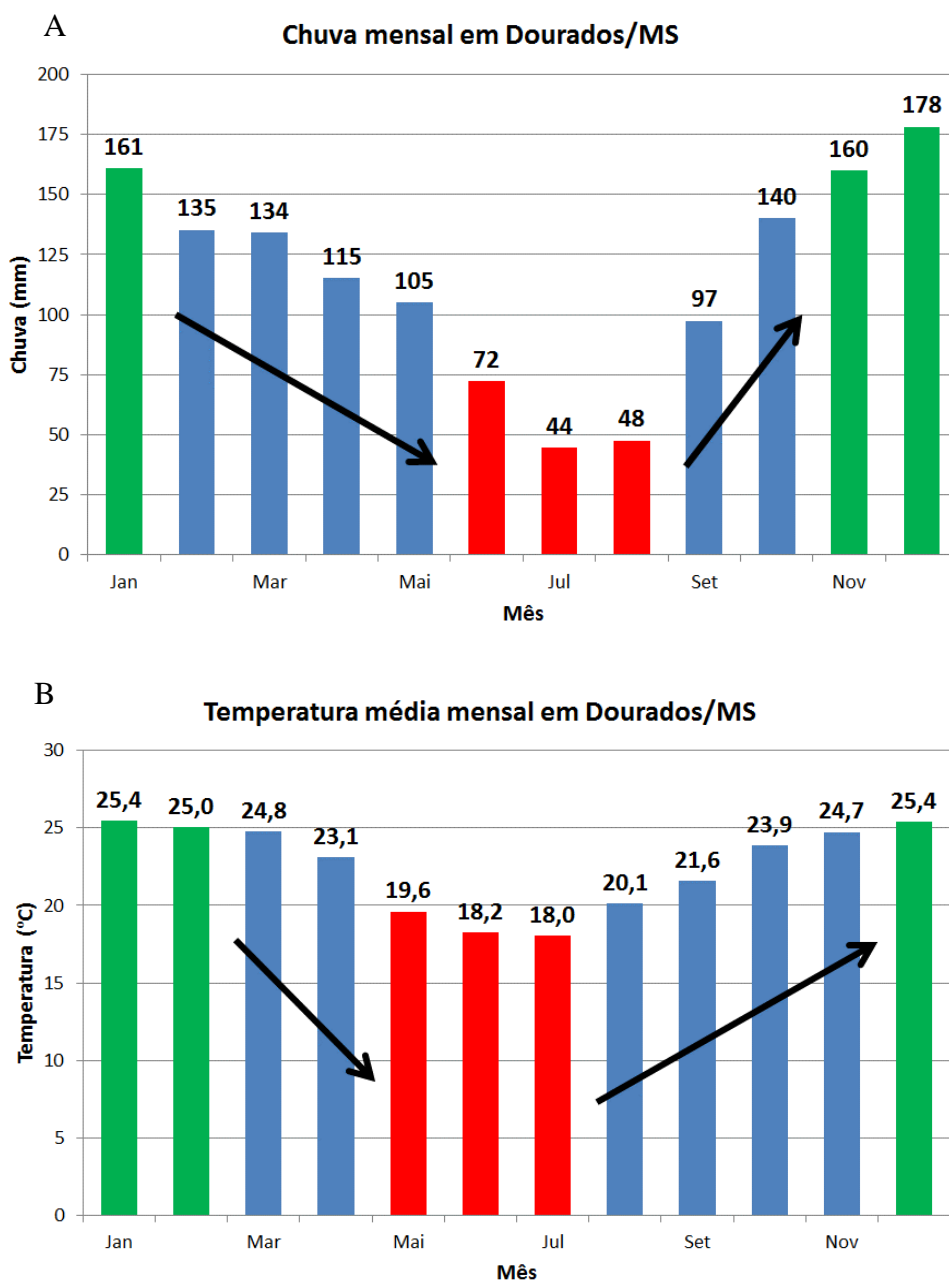


Figura 2. Médias mensais da precipitação (A) e temperatura (B) na região de Dourados, Mato Grosso do Sul durante o período de 1980 a 2012 (33 anos).

A região é marcada pela irregularidade das chuvas, tanto em termos de volume precipitado por ano, como também, quando analisado os mesmos meses em anos distintos. Além disso, na estação chuvosa é comum a ocorrência de veranicos e chuvas localizadas que resultam em grande variabilidade espacial. Por fim, é comum a ocorrência de geadas no inverno em alguns anos, sendo a sua intensidade variável em função do ano e do relevo.

3.2 O solo

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distroférrico (AMARAL et al., 2000). O solo é profundo e apresenta textura muito argilosa (65 a 70% de argila), porém sua capacidade de retenção de água é menor que a de solos tipicamente argilosos devido ao alto teor de óxido de ferro, fato que também implica em alta capacidade de infiltração de água e baixa capacidade de troca catiônica. Sua fração argila é do tipo 1:1, predominando a caulinita e o óxido de ferro (maior que 18%). A topografia da região é plana, com inclinação, em geral, menor que 3%. Devido ao manejo, que há anos é realizado no solo, a sua fertilidade é média a elevada.

No ano de 2013, foram abertas três trincheiras na área experimental para caracterização mais minuciosa do solo. Foram utilizados anéis de Kopeck, castelinho, martelo pedológico, faca de laboratório e papel alumínio, amostras foram coletadas de 10 em 10 cm, no perfil de 0 a 100 cm de profundidade. Em seguida, as amostras foram encaminhadas ao laboratório de solos da Embrapa Agropecuária Oeste, para a realização das análises físicas e químicas principais. O resultado das análises pode ser verificado na Tabela 2. As práticas de correção química do solo foram adotadas desde então para permitir o cultivo da sucessão soja-milho safrinha na área experimental.

Tabela 2. Análises químicas e físicas do solo.

Parâmetros	Camadas (m)									
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	0,40-0,50	0,50-0,60	0,60-0,70	0,70-0,80	0,80-0,90	0,90-1,00
pH água	5,50	5,30	5,30	5,40	5,50	5,70	5,70	5,50	5,50	5,40
pH CaCl ₂	4,70	4,50	4,50	4,00	4,70	5,00	5,00	4,80	4,70	4,60
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,40	0,50	0,70	0,60	0,30	0,20	0,20	0,30	0,40	0,40
Ca (cmol _c dm ⁻³)	3,40	3,60	2,60	2,00	2,10	2,00	2,00	1,20	0,80	0,70
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,20	1,10	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,20	0,10	0,10
H ⁺ + Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	6,90	7,30	5,90	5,00	4,50	3,60	3,70	3,70	4,00	3,90
K (cmol _c dm ⁻³)	1,00	0,46	0,28	0,11	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
P (Melich)	22,50	74,20	2,50	1,70	1,40	1,10	1,00	1,00	0,90	0,90
SB (cmol _c dm ⁻³)	5,60	5,16	3,68	2,01	2,76	2,55	2,44	1,43	0,93	0,83
CTC (cmol _c dm ⁻³)	12,50	12,50	9,60	7,80	7,20	6,20	6,10	6,20	5,00	4,70
CTC efet. (cmol _c dm ⁻³)	6,00	5,70	4,40	3,40	3,10	2,80	2,60	1,70	1,30	1,20
m (%)	7,00	9,00	15,00	10,00	10,00	7,00	8,00	17,00	30,00	33,00
V(%)	45,00	41,00	38,00	38,00	33,00	41,00	40,00	28,00	19,00	17,00
Cu (mg dm ⁻³)	8,30	9,20	8,50	6,00	4,80	3,70	3,60	3,70	3,80	3,50
Fe (mg dm ⁻³)	20,80	24,60	28,20	22,50	22,10	22,00	24,50	26,70	25,90	27,50
Mn (mg dm ⁻³)	27,60	21,30	16,50	10,10	6,80	6,40	6,30	5,80	4,90	4,00
Zn (mg dm ⁻³)	1,20	0,40	0,40	0,30	0,30	0,20	0,20	0,20	0,30	0,20
Areia (g Kg ⁻¹)	160	160	193	160	193	126	160	126	143	126
Silte (g Kg ⁻¹)	110	93,0	44,0	60,0	27,0	77,0	60,0	61,0	60,0	61,0
Argila (g Kg ⁻¹)	730	747	763	700	780	797	780	813	797	813

Laboratório de análise de solo. Embrapa Agropecuária Oeste.

3.3 Estação agrometeorológica

A área experimental dispõe de uma estação agrometeorológica que monitora os principais elementos climáticos da região desde 1979. A coleta de dados é realizada automaticamente em intervalo de 15 minutos, horários e diários, sendo publicados em tempo real na internet no site Guia Clima (<http://www.cpa.embrapa.br/clima/>), onde também é possível consultar o banco de dados históricos. Todos os equipamentos da estação (Tabela 3) são submetidos à manutenção bimestral, seguindo as recomendações dos fabricantes e aquelas constantes em ASAE (2004) e ASCE-EWRI (2005).

Tabela 3. Equipamentos existentes na Estação Agrometeorológica da Embrapa Agropecuária Oeste em Dourados, Mato Grosso do Sul

Equipamento	Variável medida	Modelo	Marca
Datalogger	Coletor de dados	CR1000	Campbell Scientific®
Termohigrômetro	Temperatura e umidade relativa do ar	HC2S3	Rotronic®
Piranômetro	Radiação solar global	CMP3	Kipp & Zonen®
Saldo radiômetro	Saldo de radiação	Q-7.1	REBS®
Anemômetro sônico	Velocidade e direção do vento	WindSonic 1	Gill Instruments®
Barômetro	Pressão atmosférica	PTB 110	Vaisala®
Pluviômetro	Chuva	TE525MM	Texas Electronics®

A estação (Figura 3) está localizada em uma área de 1,4 ha com superfície coberta com grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé), também conhecida como grama Mato Grosso ou forquilha e, em inglês, Bahia Grass ou Commom Bahia. Nesta área, a estação está posicionada de tal forma que a menor distância da mesma até o final da bordadura gramada tem 37 m, garantindo a minimização de problemas relacionados à advecção. O gramado recebe roçagens frequentes para manter a sua altura entre 8 e 15 cm, além de tratos culturais adequados e irrigação na época seca para mantê-lo livre de deficiência hídrica (se necessário).

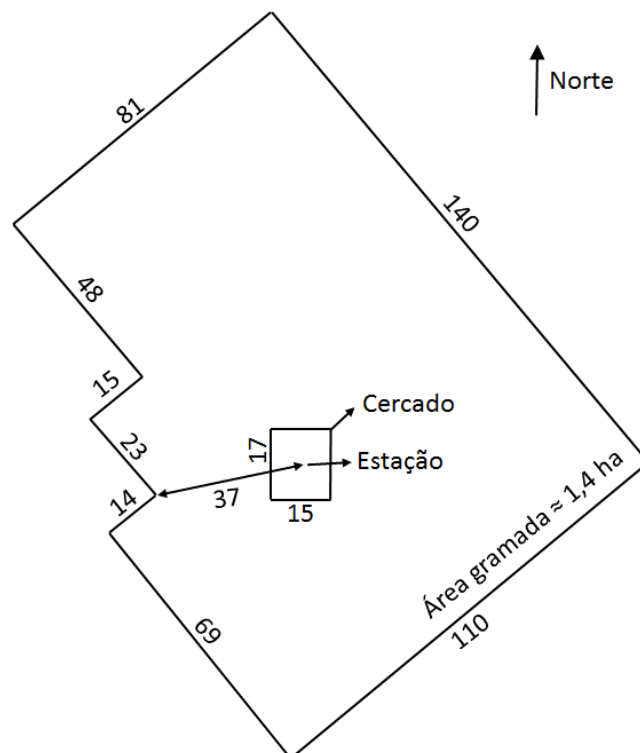


Figura 3. Croqui da Estação Agrometeorológica da Embrapa Agropecuária Oeste localizada em Dourados, Mato Grosso do Sul (latitude 22°16'S, longitude 54°49'O e altitude de 408 m). Cotas em metros.

3.4 Área experimental

A área experimental é de 0,55 ha, apresentando dimensões de 85 x 65 m. O centro da área experimental conta com um lisímetro de pesagem direta para a realização de estudos com consumo hídrico da sucessão soja-milho safrinha (Figura 4).

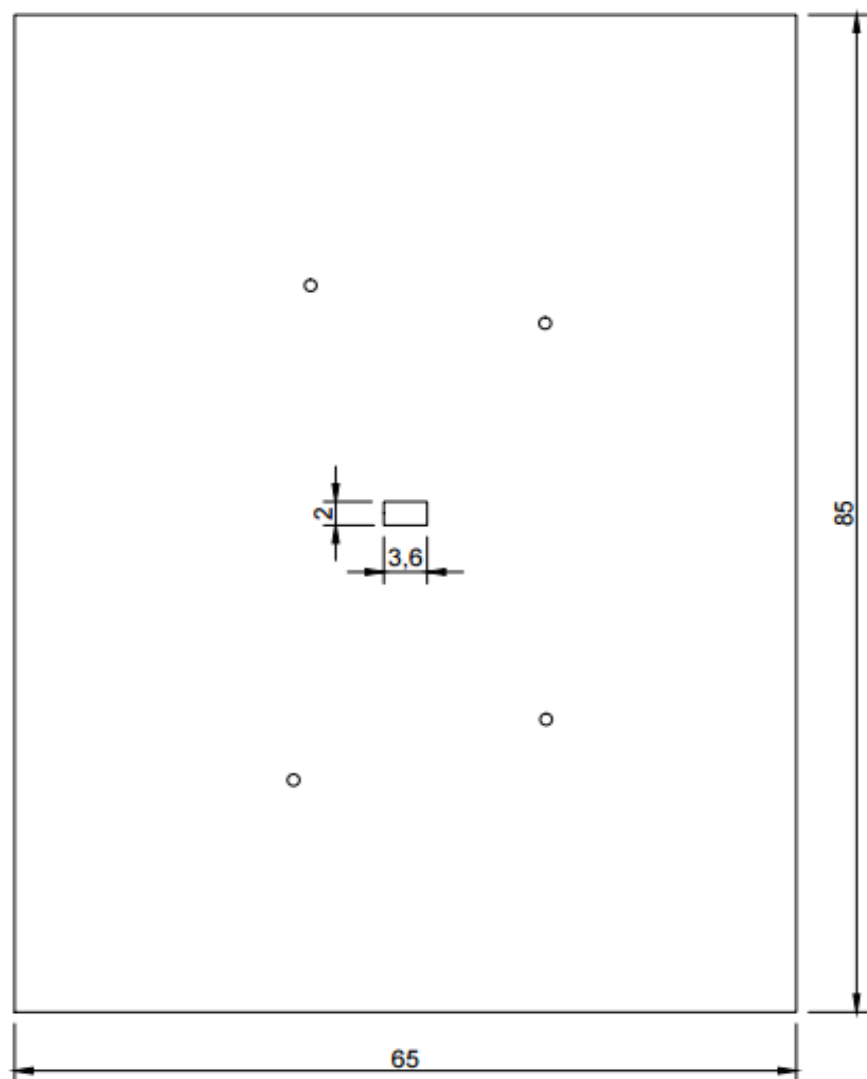


Figura 4. Croqui da área experimental. O retângulo central representa o lisímetro de pesagem e as circunferências representam os microlisímetros. Cotas em metros e desenho na escala 1:500.

O lisímetro se encontra locado de tal forma, que a distância mínima do mesmo, até a borda da parcela experimental é de, aproximadamente, 31 m. Esse fato garante que a atmosfera atuante nas plantas do lisímetro possui as características desejáveis. Soma-se a isso, o fato de que os cultivos praticados no entorno da área experimental (Figura 5) também são todos irrigados. Essas condições descritas contribuem para que seja minimizado eventuais problemas de aporte de energia advectiva para as plantas do lisímetro, o que resultaria em valores inflacionados de ET.



Figura 5. Croqui da área experimental e de seu entorno. Nele nota-se a área “5B” na qual o lisímetro se encontrava instalado e onde foi realizado o experimento.

3.5 Implantação do experimento com milho safrinha

No dia 05 de março de 2015, foi semeado o milho na área experimental. O híbrido utilizado foi o AG9010. Este material genético foi utilizado no experimento por ser um material de uso comum pelos produtores da região, que buscam a utilização de materiais mais precoces para encerrar o ciclo antes que possam ocorrer as geadas no inverno.

A semeadura na área experimental foi feita com equipamento apropriado, porém, na área do lisímetro e nas suas proximidades foi realizada manualmente (Figura 6). O espaçamento adotado foi de 45 cm entre linhas, com a densidade populacional de 55.555 plantas ha⁻¹. Isso, resultou no cultivo de oito linhas de milho dentro da área do lisímetro, com 5 plantas em cada linha e 40 plantas dentro do lisímetro. A adubação foi realizada de acordo

com a análise do solo, bem como os tratos culturais conforme os padrões da região, ambos realizados visando atingir o máximo potencial produtivo.



Figura 6. Implantação do experimento (05/03/2015). (A) Semeadura mecanizada do milho; (B) Semeadura manual do milho no interior e proximidades do lisímetro; (C) Área próxima ao lisímetro após a semeadura.

3.6 Irrigação

O cultivo foi irrigado por um sistema de aspersão fixa com capacidade para irrigar 6 mm h^{-1} (figura 7). O manejo da irrigação foi realizado com turno de rega variável, sendo que o momento e a lâmina de irrigação necessárias foram determinadas com base nas leituras de armazenamento de água no solo que foi fornecido pelo próprio lisímetro.

A irrigação foi manejada de forma que se aplicou uma lâmina na pré-semeadura garantindo a umidade inicial para o start das plantas e depois, durante o ciclo de cultivo, a irrigação foi manejada de forma a garantir que a zona radicular (que foi considerada variável)

estivesse com condições de umidade entre 45% da capacidade de água disponível e a capacidade de campo. A irrigação foi realizada em área total. A profundidade efetiva do sistema radicular foi considerada de 25 cm durante os 35 dias após a semeadura (DAS), 50 cm do 36° ao 70° DAS e 70 cm do 71° ao 140° DAS, final do ciclo.



Figura 7. Cultivo do milho safrinha irrigado por sistema de aspersão fixo.

3.7 Lisímetro de pesagem e medição da evapotranspiração

O lisímetro (Figura 8) possui formato retangular e $7,2 \text{ m}^2$ de área superficial ($3,6 \times 2 \text{ m}$). A profundidade útil do solo dentro do lisímetro é de 1 m. O mesmo foi construído usando tanque de aço carbono tipo 1020 e paredes e piso de concreto. Conta com sistema de iluminação subterrânea e fosso de acesso. O sistema de pesagem foi confeccionado usando células de carga da marca HBM[®], modelo RTNC3 4,7ton associado ao suporte VEN. O lisímetro possui quatro células de carga que, combinadas, apresentam capacidade total de pesagem de 18,8 ton. As células são lidas por um *datalogger* CR1000 da marca Campbell Scientific[®] conectado a um multiplexador de canais AM16/32 da mesma marca. As leituras de todas as células são tomadas a cada 5 s e as médias são publicadas e armazenadas pelo *datalogger* a cada 10 min. A média do sinal das quatro células (mV) do lisímetro são convertidas para massa (kg), usando coeficiente de conversão que foi determinado após a calibração em campo do lisímetro.

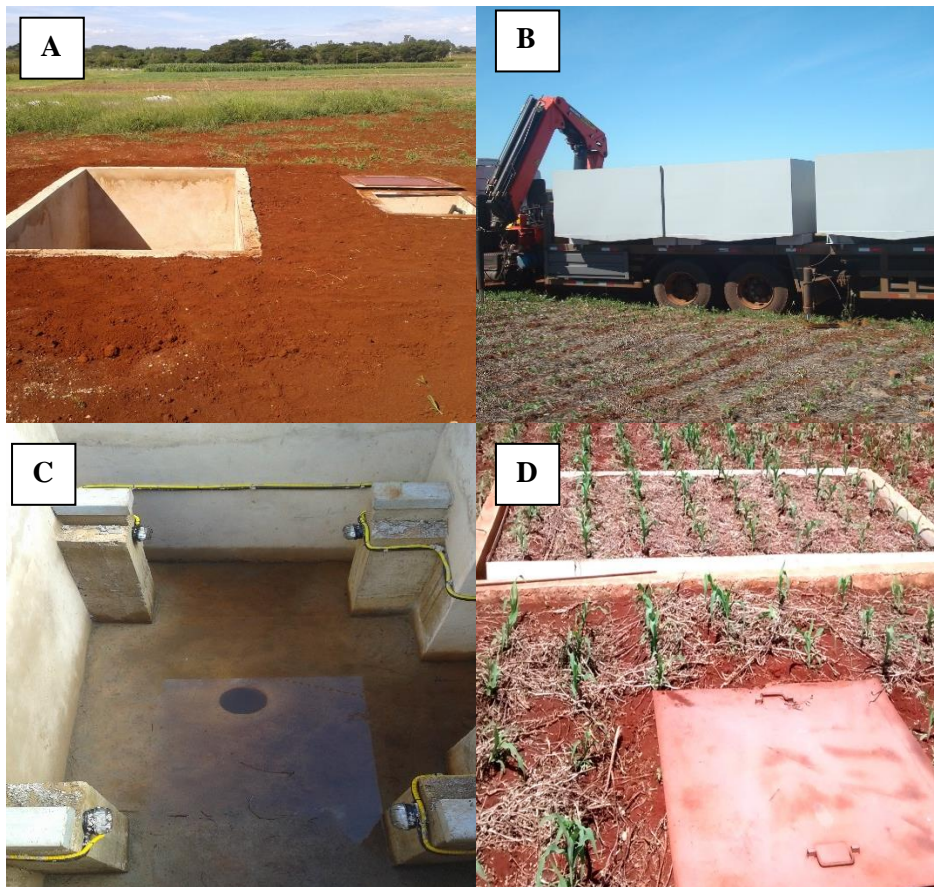


Figura 8. Lisímetro de pesagem na área experimental. (A) Estrutura em alvenaria para instalação do lisímetro; (B) Lisímetro em aço carbono; (C) Estrutura em alvenaria para suporte do lisímetro, com pilares em concreto e instalação elétrica pronta; (D) Lisímetro de pesagem devidamente instalado e sendo cultivado.

O sistema de aquisição dos dados teve a função de determinar e armazenar todas as variações ocorridas com a massa do lisímetro durante a safra. As coletas de dados foram feitas semanalmente usando notebook, que conectado ao datalogger e com o auxílio do software LoggerNet (Figura 9), os valores coletados foram convertidos em arquivo compatível com Microsoft Office Excel®.

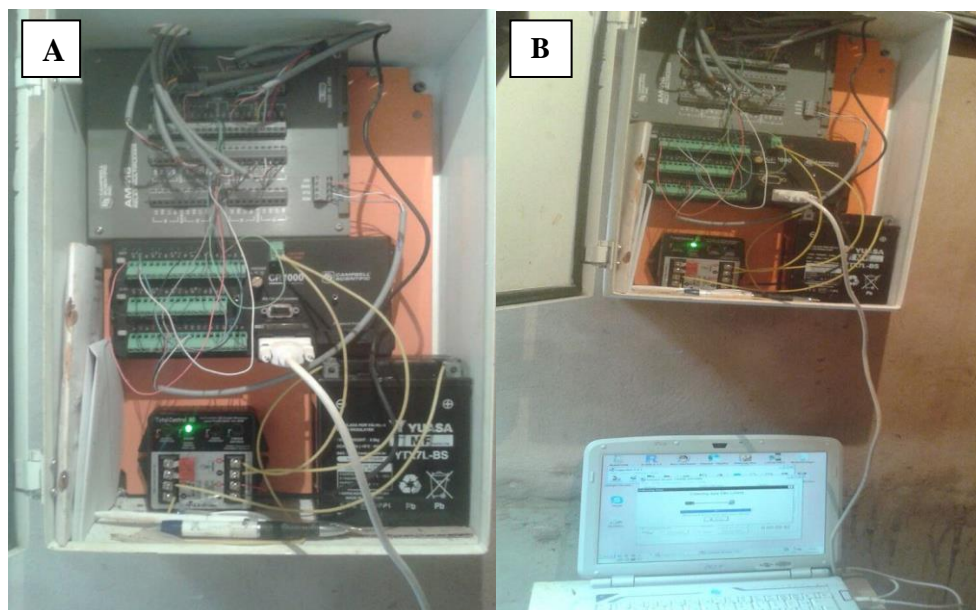


Figura 9. Sistema de aquisição e armazenamento de dados do lisímetro. (A) Datalogger instalado no fosso subterrâneo do lisímetro; (B) Aquisição de dados do lisímetro utilizando notebook.

Em planilha do Microsoft Office Excel[®] foram realizados todos os cálculos. A conversão do valor da massa do lisímetro (Kg) em mm de lâmina de água foi feita dividindo-se pela área do mesmo (7,2 m²).

A ET foi determinada pela contabilidade das entradas e saídas de água no lisímetro, num balanço hídrico, de acordo com a equação 4:

$$ET = P + I \pm Es - D \pm \Delta A \quad (4)$$

onde ET é a evapotranspiração, P é a precipitação, fornecida pelo site Guia Clima, I é a lâmina de irrigação, Es é o escoamento superficial, D é a drenagem, determinada pelo próprio lisímetro, e ΔA é a variação do armazenamento dado pela diferença de massa no lisímetro. A unidade de todas as variáveis é em mm. O valor de Es foi considerado nulo, uma vez que os lisímetros possuem bordas elevadas.

3.8 Microlisímetros

A construção dos microlisímetros (ML) seguiu a metodologia de Flumignan et al. (2012). Foram construídos ML utilizando tubos de PVC rígido, sendo que a estrutura interna foi de 100 mm de diâmetro, com o comprimento de 150 mm, e a parede com espessura de 2,5

mm, sendo a parte inferior vedada por um CAP de PVC. Para o envoltório externo, foi utilizado também tubo de PVC com medidas semelhantes, porém com diâmetro de 150 mm (Figura 10).

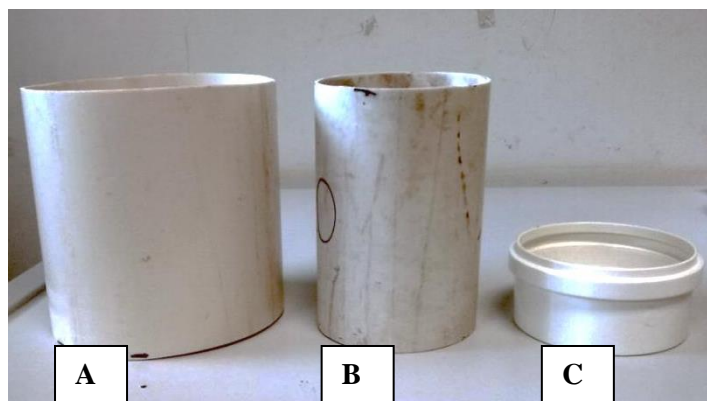


Figura 10. Componentes do ML; (A) envoltório externo; (B) ML; (C) CAP para isolar a parte inferior do ML.

O processo de extração dos ML consiste em um trabalho relativamente árduo. Por isso, visando manter a estrutura do solo e facilitar o processo, um amostrador foi desenvolvido por Lena (2013) (Figura 11). O amostrador possui a mesma dimensão do ML, ou seja, 100 mm de diâmetro, e é composto por um cilindro de corte (onde o ML é inserido), além de uma base capaz de receber o impacto dos golpes. Conforme a base é golpeada por um peso de cerca de 10Kg, direcionado por uma haste, o cilindro de corte atinge o solo em maiores profundidades, de modo que o volume do ML seja completamente preenchido com o perfil do solo. Em seguida, com o auxílio de uma haste retira-se o extrator do solo.

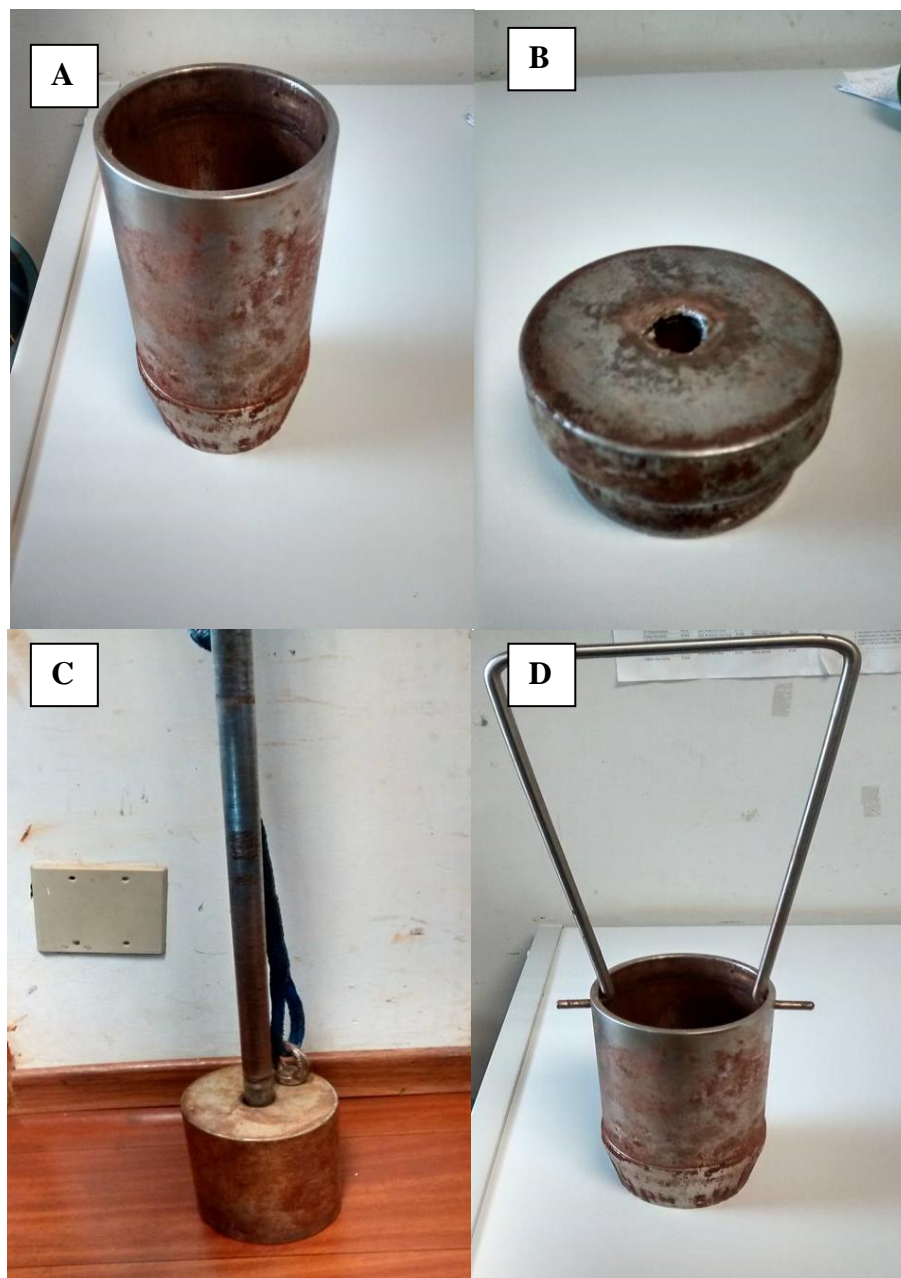


Figura 11. Componentes do amostrador de microlisímetro. (A) Cilindro de corte; (B) Base que recebe os golpes; (C) Peso de 10 Kg para os golpes; (D) Cilindro com a haste usada para retirar o cilindro cravado no solo.

Após a extração do ML (Figura 12), retira-se o tubo e faz-se a limpeza da parte externa, pois, para facilitar, é utilizado óleo vegetal nas paredes externas dos ML. Após, faz-se a vedação da parte inferior com o CAP que evita a drenagem. Feito isso, volta-se o ML para o local de onde foi extraído o monólito.

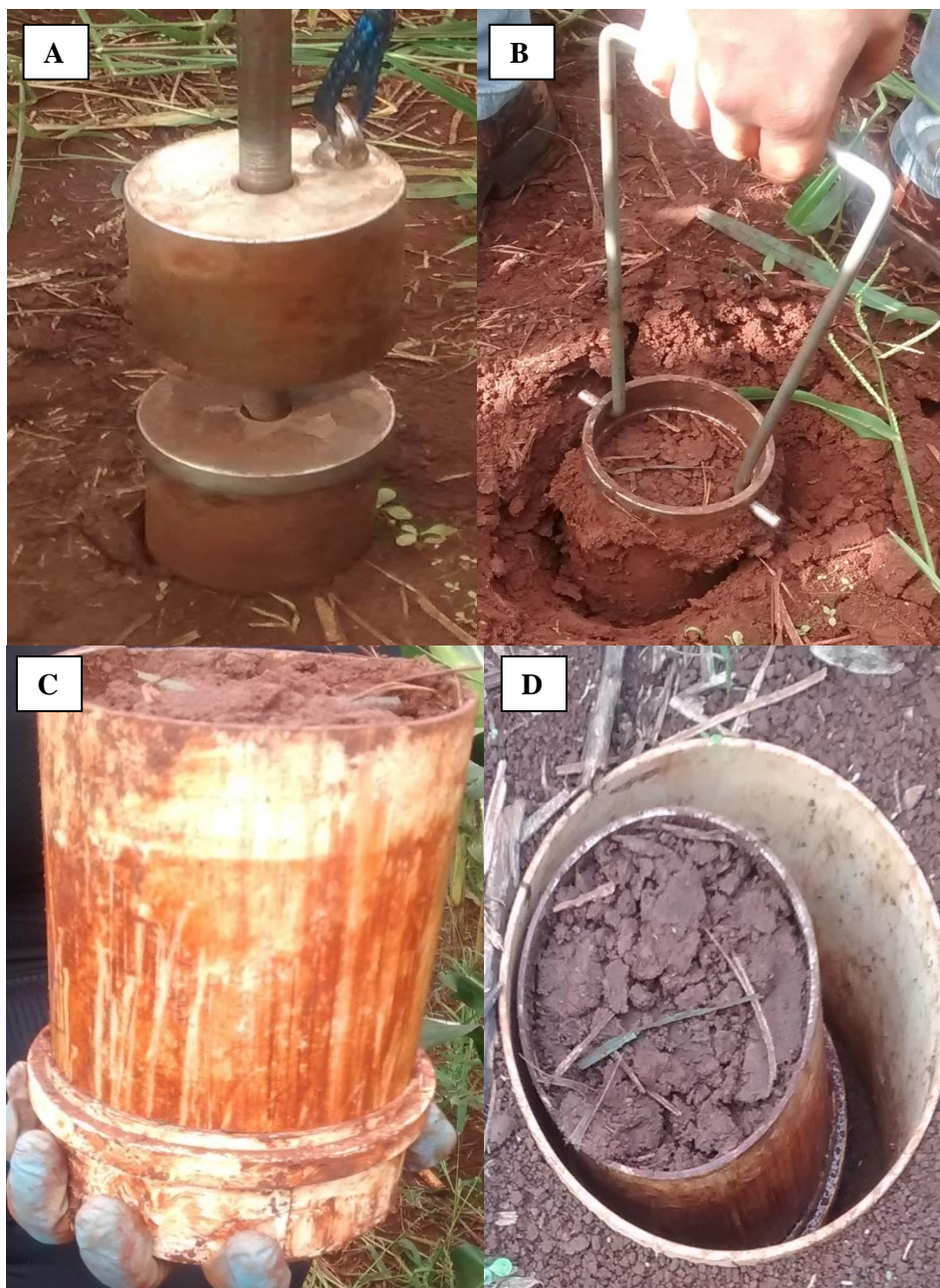


Figura 12. Instalação dos microlisímetros na área experimental. (A) Golpes para extração da amostra; (B) Retirada do microlisímetro de modo a permanecer o perfil interno do solo de maneira intacta; (C) Microlisímetro com o CAP instalado; (D) ML devidamente instalado para uso.

Foram instalados quatro microlisímetros, distribuídos uniformemente sobre a área experimental. As taxas de E foram obtidas através de mensurações da variação da massa dos ML em balança de precisão.

Quando instalado o ML no campo, para que houvesse precisão e veridicidade das leituras, além de uma balança precisa, também foi necessária à ausência de chuvas ou irrigação, pois a parte inferior do ML é vedada e conforme a lâmina de água ocorre o acúmulo

de água, fugindo da realidade de E, vindo a superestimar os valores de E, pois quanto mais úmido o solo maior será os valores de E. Devido às condições necessárias para a instalação e mensuração dos ML e a grande ocorrência de chuvas durante a safra, a frequência de extração dos microlisímetros e a quantidade de dias de leitura foram variáveis. De qualquer forma, a determinação da E através dos ML foi realizada em 7 períodos durante a safra, que totalizaram 30 dias: do 5 ao 7° DAS (Série 1); do 34 ao 37° DAS (Série 2); do 54 ao 57° DAS (Série 3); do 68 ao 72° DAS (Série 4); do 89 ao 93° DAS (Série 5); do 106 ao 110° DAS (Série 6); do 134 ao 137° DAS (Série 7).

A E do solo foi medida pela variação da massa do ML, determinada diariamente (durantes os 7 períodos), sempre na ocasião do pôr do sol. Através da Equação 5 fez-se a conversão da massa de água evaporada em Kg para mm.

$$E = \frac{\Delta M}{\pi r^2} \quad (5)$$

onde E é a evaporação do solo em mm, ΔM é a variação da massa do ML em gramas, e r é o raio do ML em m. Considerando que o ML possuía raio de 50 mm (0.05 m), cada variação de 7.8 g correspondia a E de 1 mm de lâmina de água.

3.9 Determinação da transpiração

A T das plantas foi determinada nos mesmos períodos na qual a E do solo foi medida.

Com os valores de ET fornecidos pelo lisímetro de pesagem, através do balanço de entradas e saídas de água, e a E do solo medida pelos ML, calculou-se a T das plantas por diferença, utilizando a equação 1.

3.10 Determinação dos valores de K_c , K_e e K_{cb}

Utilizando os valores diários de ET medidos pelo lisímetro e os valores de ET_0 da estação agrometeorológica presente na área, fornecidos pelo site Guia Clima, foram calculados os valores de K_c diário por meio da equação 3.

Com os valores de E, T e ET_0 foram determinados os valores de K_e e K_{cb} . Os valores de ET_0 foram fornecidos em escala horária pela estação agrometeorológica e integrados para

que fosse possível compreender o mesmo período de avaliação dos ML. Os valores de K_e e K_{cb} foram determinados pelas equações 6 e 7, respectivamente:

$$K_e = \frac{E}{ET_0} \quad (6)$$

$$K_{cb} = \frac{T}{ET_0} \quad (7)$$

onde o K_e é o coeficiente de evaporação do solo (adimensional), E é a evaporação do solo (mm), ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm), K_{cb} é o coeficiente de cultivo basal (adimensional) e T é a transpiração das plantas (mm).

3.11 Modelagem dos valores de K_c , K_e e K_{cb}

Allen et al. (1998) determinaram pelo boletim 56 da FAO valores de K_{cini} (K_c da fase inicial), K_{cmid} (K_c da fase intermediária) e K_{cend} (K_c no final do ciclo), para diversas culturas, além de determinar o tempo que duram as fases: inicial, desenvolvimento, intermediária e final. De acordo com os autores, com esses valores e usando a equação apropriada é possível determinar o K_c para qualquer dia do ciclo.

O valor de K_{cini} proposto pela FAO 56 é replicado durante toda a fase inicial, a fase de desenvolvimento requer o uso da equação (Equação 8), a fase intermediária é composta pelo valor de K_{cmid} tabelado, e a fase final também precisa de equação (Equação 8) para ser calculada, exceto para o último dia de ciclo que será o próprio valor de K_{cend} .

$$K_{ci} = K_{cprev} + \left[\frac{i - \sum(L_{prev})}{L_{stage}} \right] (K_{cnext} - K_{cprev}) \quad (8)$$

onde K_{ci} é o K_c do dia que se deseja determinar, K_{cprev} é o valor de K_c do estágio anterior, i é o número do dia dentro do estágio de crescimento, $\sum(L_{prev})$ é o somatório das durações de todos os estádios anteriores em dias, L_{stage} é a duração do estágio em consideração em dias e, por fim, K_{cnext} é o K_c da próxima fase.

Utilizando-se dessa fórmula, e dos valores de K_c do milho e duração das fases da cultura tabelados no boletim 56 da FAO, foi calculado todos os valores de K_c modelado para os 140 dias de ciclo da cultura do milho segundo o boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998).

Além disso, com o uso dessa equação e utilizando os valores de K_{cini} , K_{cmid} e K_{cend} que foram determinados no lisímetro e as durações das fases determinadas em campo, confeccionou-se também a curva de K_c modelado dos dados medidos para todos os dias do ciclo.

O boletim 56 da FAO também fornece os valores tabelados de K_{cini} , K_{emid} e K_{eend} para algumas culturas. Como é fornecido para a cultura do milho, realizou-se também a modelagem dos valores de K_e para todo o ciclo usando a mesma equação 8, alterando apenas o coeficiente utilizado, ou seja, de K_c altera-se para K_e .

Com os valores de K_c e K_e modelados, e sabendo-se que o K_{cb} é a diferença entre estes, por diferença também modelou-se os valores de K_{cb} para todo o ciclo do milho, tanto para os valores tabelados pelo boletim 56 da FAO, quanto para os dados obtidos no lisímetro.

3.12 Índice de área foliar

A determinação do IAF do milho foi realizada 10 vezes durante a safra: 2 DAS (Série 1); 19 DAS (Série 2); 36 DAS (Série 3); 50 DAS (Série 4); 62 DAS (Série 5); 71 DAS (Série 6); 92 DAS (Série 7); 106 DAS (Série 8); 112 DAS (Série 9); 124 DAS (Série 10).

Optou-se por determinar a área foliar por método não destrutivo, no qual se mediu com fita métrica a largura máxima da folha e o seu comprimento (Figura 13), assumindo o fator de correção 0,75 (Equação 9) (STICKLER et al., 1961; WOLSCHICK, 2003; SANGOI, 2007).

$$AF = C \times L \times 0,75 \quad (9)$$

onde AF é a área da folha (m^2), C é comprimento da folha (m) e L a largura máxima da folha (m). Assim, com a equação 10, foi possível determinar o IAF.

$$IAF = \frac{ATF}{A} \quad (10)$$

onde IAF é o índice de área foliar (adimensional), AFT é a área foliar total (m^2) e A é a área de terreno ocupada por uma planta (m^2).

Foram selecionados quatro blocos ao acaso para cada amostragem. Cada bloco foi representado por uma população de seis plantas vizinhas entre si e em bom estado. O processo de mensuração do comprimento e largura máxima da folha foi realizado em todas as folhas consideradas em vigor de toda população selecionada para amostragem.



Figura 13. Mensuração da área foliar. (A) Mensuração do comprimento; (B) mensuração da largura máxima.

No processo de amostragem, as folhas em senescência, não foram consideradas para o cálculo do IAF.

3.13 Duração das fases

A determinação da duração das fases foi realizada pela interpretação dos valores medidos de K_c . Para isso, plotou-se um gráfico dos valores de K_c nos 140 dias de ciclo, onde obteve-se a curva característica. Com o gráfico foi possível visualizar os dois patamares, primeiro com os valores mais baixos que representa a fase inicial e um patamar de valores máximos que representam a fase intermediária. Além destes, foi possível identificar também

as duas rampas, uma crescente (fase de crescimento), que liga o patamar inicial ao patamar intermediário, e a outra decrescente (fase final), a qual liga a fase intermediária com o último valor de K_c do ciclo. Assim, tendo os valores tabelados e a curva do K_c verificou-se em que dia iniciou e terminou cada fase (inicial, crescimento, intermediária e final), depois fez-se a contabilização da duração de cada fase, totalizando 140 dias de ciclo.

3.14 Colheita e determinação da produtividade

A colheita foi realizada no dia 23 de julho de 2015, totalizando o ciclo de 140 dias.

Para a produtividade selecionaram-se oito blocos ao acaso na área externa ao lisímetro, cada um com três linhas de plantas e em cada linha amostrou-se cinco plantas, totalizando uma população de 15 plantas por bloco. Além da área externa, foram colhidas também as plantas de dentro do lisímetro. Essa colheita foi realizada manualmente (Figura 14).

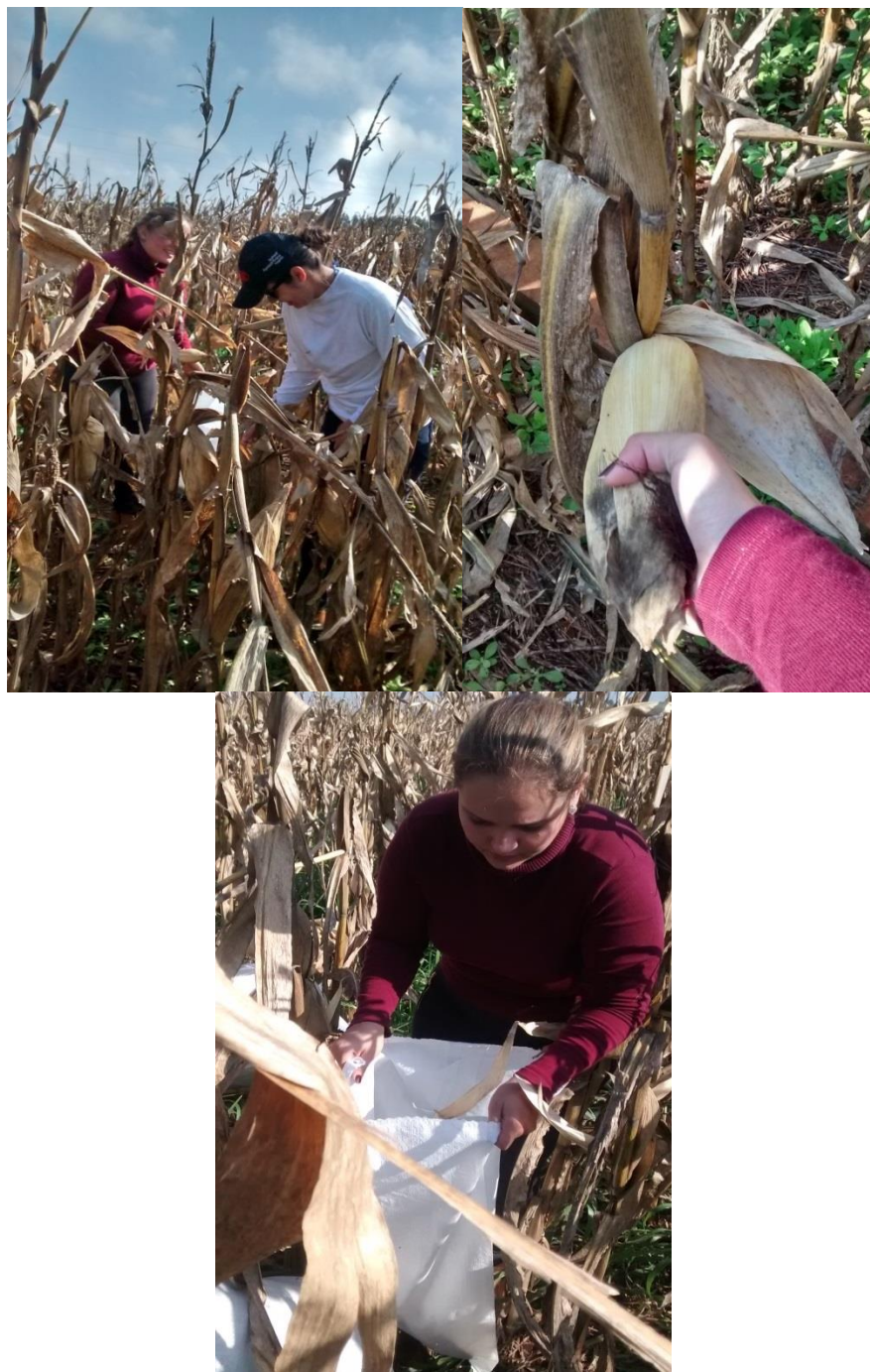


Figura 14. Colheita realizada dia 23/07/2015, manualmente, nos blocos amostrados e no lisímetro.

Após a colheita manual, trilhrou-se o milho e, em seguida, fez-se a pesagem das amostras com balança digital. Depois, determinou-se a umidade dos grãos colhidos usando o medidor de umidade de grãos da marca Gehaki, modelo G919 (Figura 15).



Figura 15. Processo para determinação da umidade de colheita do milho. (A) Trilhadeira; (B) pesagem da amostra em balança digital; (C) Medidor de umidade de grãos.

A determinação da produtividade foi realizada corrigindo-se a umidade para 13%, aplicando os dados na equação:

$$P = \frac{100 - Ua}{(100 - Uc) * \left(\frac{Ma * 10000}{A} \right)} \quad (11)$$

onde P é a produtividade (Kg ha^{-1}), Ua é a umidade atual (%), Uc é a umidade corrigida (%);
Ma é a massa atual da amostra (kg); A é a área que representa a amostra (m^2).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Índice de área foliar

Houve uma rápida expansão do IAF no início do ciclo e logo após estabeleceu-se uma espécie de patamar com os valores máximos, os quais por sua vez foram drasticamente reduzidos ao final do ciclo com a maturação das plantas. Os máximos valores de IAF ocorreram entre 42 e 92 DAS, verifica-se ainda que o maior IAF ocorreu por volta de 49 DAS, com o valor de 3,3 (Figura 16).

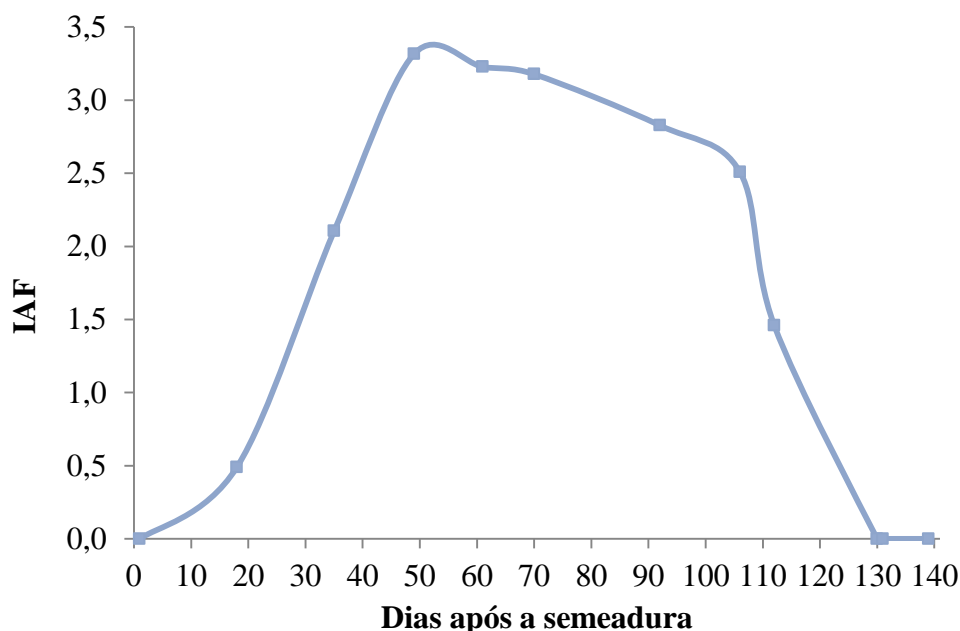


Figura 16. Índice de área foliar (IAF), adimensional, do milho safrinha medido em diferentes períodos durante o ciclo.

Cerca 92 DAS observa-se uma redução do IAF, porém a queda mais brusca foi entre 106 a 130 DAS. No dia 11 de julho de 2015 (130 DAS) considerou-se o IAF igual à zero, pois todas as folhas apresentavam grande parte da sua área amarelada, impossibilitando o cálculo de IAF pelo método utilizado.

4.2 Duração das fases durante o ciclo

A duração das fases observadas no campo distinguiram-se muito em relação a duração padronizada pelo Boletim 56 da FAO (Tabela 4), fato que evidencia a obtenção de melhores resultados em levantamentos de campo que consideram as características de solo e clima regional, para além do uso de materiais genéticos cultivados na região.

Nota-se um rápido desenvolvimento da cultura, onde as fases: inicial e de crescimento possuem duração bem mais curta do que a da FAO. Logo, vê-se a antecipação da fase intermediária. Verifica-se ainda que a fase intermediária medida, aquela onde normalmente ocorre a maior demanda evapotranspiratória, foi mais de duas vezes maior em relação à quantidade de dias proposto pela FAO, de modo que a utilização da duração das fases estabelecidas pela FAO em cálculos de necessidades hídrica da cultura causariam a subestimativa da realidade. A maior semelhança entre valores medidos e estabelecidos pela FAO ocorreu na fase final.

Tabela 4. Duração das fases (dias) do milho safrinha determinado pelo lisímetro (Medido) e de acordo com o Boletim 56 da FAO (FAO)

Fase da cultura	Duração	
	Medido	FAO
I - Inicial	18	35
II - Crescimento	16	35
III - Intermediária	67	30
IV - Final	39	40

4.3 Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do milho safrinha

4.3.1 Evapotranspiração da cultura

As taxas de ET_0 foram maiores na fase inicial e decresceram gradativamente em direção ao final do ciclo, (Figura 17). O consumo hídrico da cultura acompanhou a tendência da ET_0 , ou seja, maiores valores na fase inicial, como consequência da elevada ET_0 . Os valores se apresentaram altos também nas fases de desenvolvimento e intermediária como

consequência da área foliar e dos valores ainda elevados de ET_0 , embora não tanto quanto na fase inicial. Já, na fase final, como consequência da pouca área foliar ocorreu a redução da demanda hídrica da cultura, com menores valores de ET_c , ou seja, houve a redução da contribuição da T das plantas na ET_c , uma vez que essas estavam em fase de envelhecimento e senescência, além da baixa demanda atmosférica (ET_0). O consumo hídrico máximo da cultura ocorreu 38 DAS e foi de $5,2 \text{ mm dia}^{-1}$, coincidindo com o período em que o IAF já se mostrava elevado (Figura 16), pois com o aumento da área foliar aumenta-se também a T das plantas, o que contribui grandemente para o aumento dos valores de ET_c .

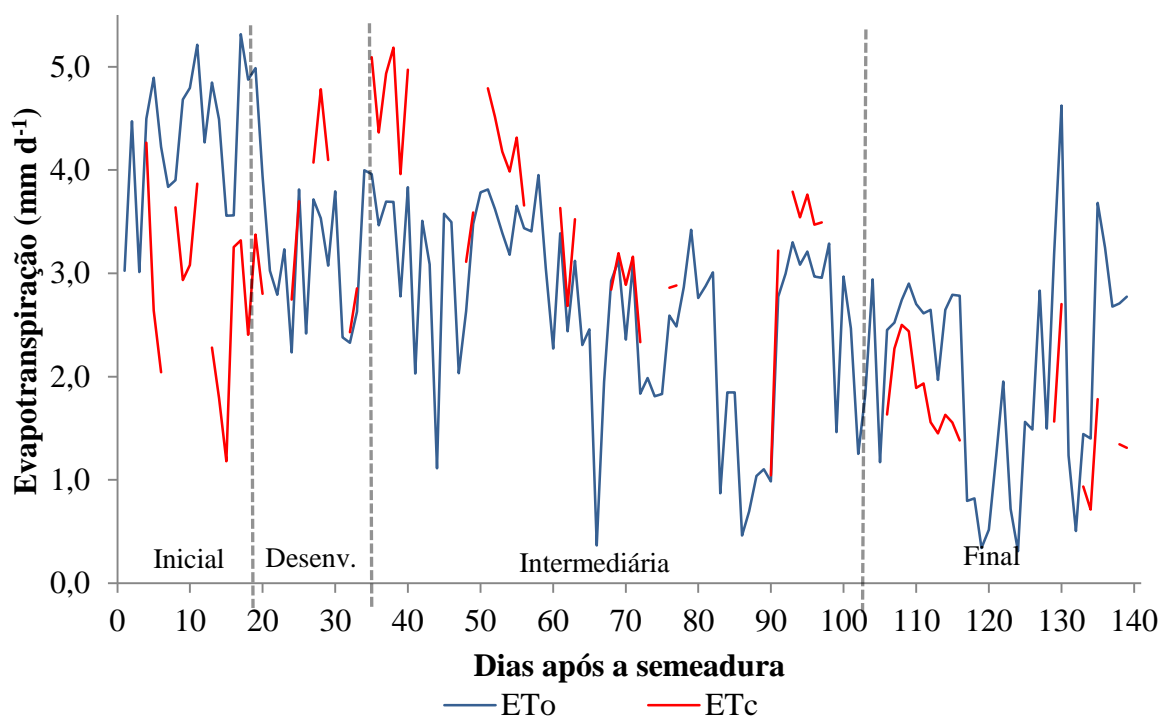


Figura 17. Valores diários de evapotranspiração de referência (ET_0) e evapotranspiração da cultura (ET_c) do milho safrinha durante todo o ciclo.

A cultura teve um consumo hídrico total de 362,5 mm durante o ciclo. Esse valor é abaixo do encontrado por Piccinni et al. (2009) no Texas, Estados Unidos, que ao avaliar os anos de 2002 a 2008 determinaram o consumo total de água pela cultura milho cultivado no verão, variando de 441 a 641 mm.

Liu et al. (2002) determinaram o consumo hídrico do milho verão, em cinco períodos, dos anos de 1995 a 2000. Para isso utilizaram lisímetros de pesagem. O estudo foi realizado na Estação Luancheng, planície norte da China e lá obtiveram um consumo total de

423 mm. Esse total é muito semelhante ao obtido por Kang et al. (2003) que encontrou consumo hídrico de 424 mm determinado por lisímetros de uma série de 10 anos, em uma região semi-árida do Noroeste da China.

O menor consumo total de água obtido neste estudo em relação aos outros está diretamente ligado à época de semeadura. O presente trabalho refere-se ao cultivo do milho na safrinha, no qual a semeadura ocorreu em 05 de março, sendo que o ciclo está entre outono e inverno, ou seja, com temperaturas mais amenas e menores valores de radiação solar, o que implica em um menor demanda evaporativa da atmosfera e, portanto, menor consumo de água pela milho safrinha quando comparado ao milho cultivado no verão.

4.3.2 Coeficiente de Cultivo

Os valores de K_c do milho safrinha medidos no lisímetro de pesagem variaram em média de 0,47 a 1,2. Devido ao K_c ser obtido pela razão entre ET_c e ET_0 , o menor valor corresponde ao K_c da fase final, ocasião em que a demanda atmosférica e demanda da cultura são baixas, por se tratar de dias de inverno e baixo ou nulo IAF. Já o maior valor representa o K_c da fase média, nesse período do ciclo da cultura o IAF é alto, logo há grande intensidade de atividades fisiológica da planta, com valores altos de T , o que contribuí para o aumento da demanda hídrica da cultura e consequentemente o aumento o K_c (Figura 18).

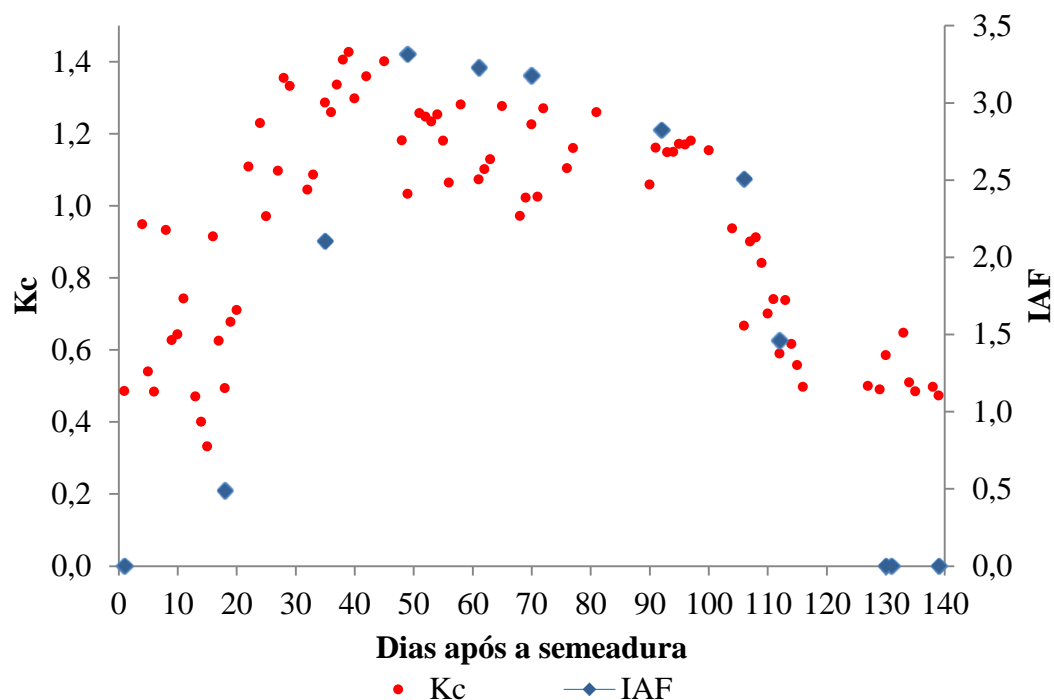


Figura 18. Coeficientes de cultivo simples (K_c) e índice de área foliar (IAF) do milho safrinha.

Os valores de K_c medidos no lisímetro para as fases inicial e final se mostraram maiores em relação aos valores de K_c apresentados pela FAO em Allen et al. (1998) (Tabela 5). Isso demonstra a maior adequação de valores medidos localmente, haja vista que o uso dos valores tabelados pela FAO devem conduzir a subestimativas das necessidades hídricas do milho safrinha cultivado na região de Dourados-MS.

Tabela 5. Coeficientes de cultivo (K_c) do milho safrinha determinado pelo lisímetro (Medido) e modelado de acordo com o Boletim 56 da FAO (FAO).

Recomendação	K_c	
	Medido	FAO
$K_{c \text{ ini}}$	0,5	0,3
$K_{c \text{ mid}}$	1,2	1,2
$K_{c \text{ end}}$	0,47	0,35

Algumas diferenças interessantes foram observadas (Figura 19) entre os valores medidos (lisímetro) e os modelados (FAO). A fase inicial do K_c medido tem uma duração

menor em relação ao do modelado. Os valores medidos crescem rapidamente, já no segundo decêndio após a semeadura, enquanto o modelado tarda mais, o que representa uma subestimativa da realidade. Além disso, os valores das fases inicial e final de K_c medidos são maiores que os modelados. Mais adiante, nota-se que a fase de maior demanda reproduziu o valor recomendado pelo Boletim 56 FAO de 1,2; porém a duração da fase medida se inicia mais cedo e tem duração maior (Tabela 4), fato que também causaria problemas de subestimativa da realidade. Por fim, a maior semelhança quanto à duração das fases medidas e modeladas foi observada na fase final, ocasião em que os valores medidos e modelados parecem iniciar a descida na mesma época.

O K_c do lisímetro na fase inicial ($K_{c\text{ ini}}$), mostrou-se bastante discrepante em relação ao valor da FAO. Este fato está relacionado ao frequente umedecimento da superfície do solo que ocorreu em decorrência das irrigações e precipitações. Esta frequência de umedecimento potencializa as taxas de evaporação do solo, contribuindo para o aumento expressivo dos valores de K_c .

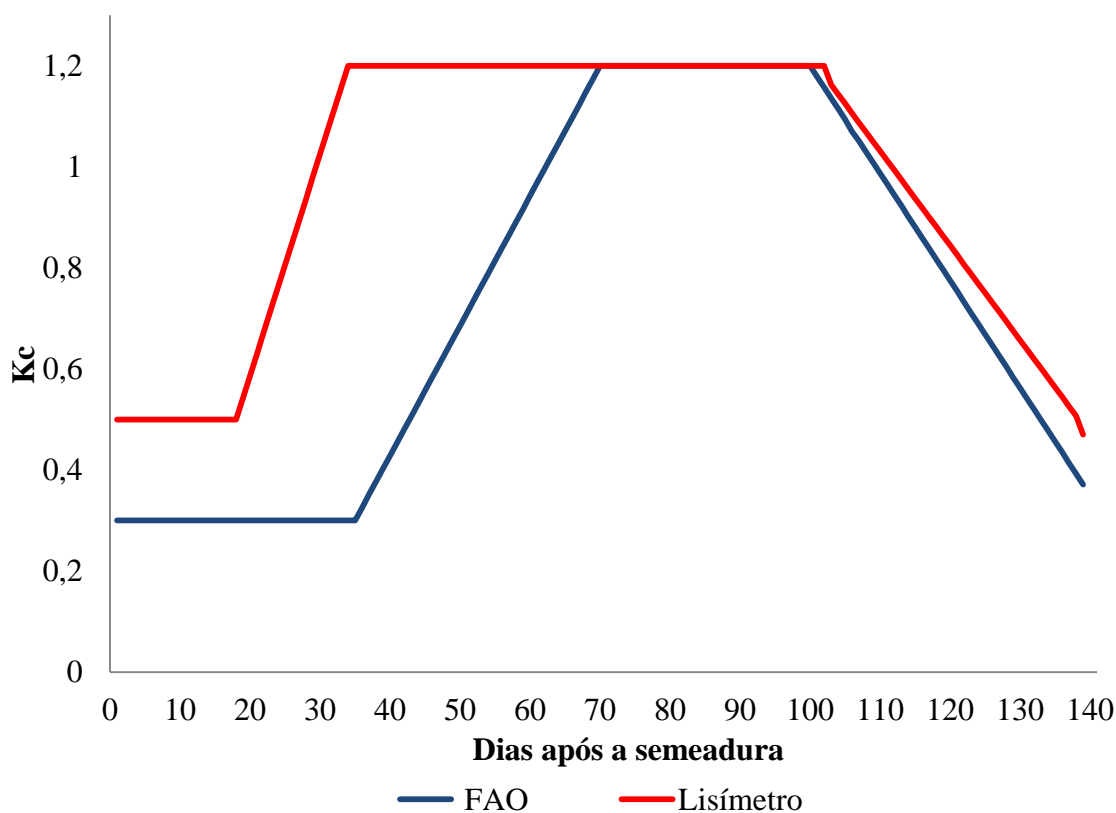


Figura 19. Coeficiente de cultivo (K_c) do milho safrinha modelado com os valores de K_c constantes no Boletim 56 da FAO (FAO) e modelado com os valores medidos pelo lisímetro (Lisímetro).

Kang et al. (2003), na China, determinaram os valores de K_c do milho verão: K_{cini} : 1,04; K_{cmid} : 1,43 e K_{cend} : 0,45, para aquela região. Esses valores mostram uma maior demanda hídrica da cultura nas fases inicial e média para a região noroeste da China em relação a região sul do Estado do Mato Grosso do Sul, no Brasil. Na fase final os valores das duas regiões assemelham-se muito.

Liu et al. (2002), em estudo realizado na Estação Luancheng, na China, encontraram valor de K_c igual a 1,1 para todo o período de crescimento e ainda relatam que o K_c para aquelas condições só é menor que 1 durante o seu estágio de plântula, diferenciando-se bastante dos valores recomendados pela FAO e dos encontrados neste trabalho.

No Texas, utilizando lisímetros de pesagem, Piccinni et al. (2009) determinaram o K_c para o milho verão, variando de 0,2 a 1,2. O valor obtido mostrou-se idêntico ao K_c para a região de Dourados na fase de maior demanda hídrica.

Souza et al. (2012), para milho cultivado na safrinha na região do Rio de Janeiro, com o ciclo entre 15 de dezembro e 15 de abril, determinaram valores de K_c oscilando entre 0,6 – 0,65 para a fase I; 0,8 – 0,9 para a fase II; 1 - 1,2 para a fase III e 0,52 – 0,7 para a fase IV. Carvalho et al. (2006), em trabalho também realizado no Rio de Janeiro, a fim de estimar a demanda de irrigação suplementar para a cultura do milho, e utilizando-se K_c corrigidos para as diferentes fases de desenvolvimento da cultura, determinaram valores de K_c para o milho safrinha variando de 0,57 a 0,71; 0,9 a 1,12; e 0,63 a 0,86, para as fases inicial, média e final, respectivamente. Bastos et al. (2008), em estudos realizados nos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, determinaram valores de K_c para o milho verão: 0,5-0,7 para a fase I; 1,1-1,3 para a fase II; 1,3-1,4 para a fase III e 0,6 para a fase IV. Nota-se que os valores K_{cini} e K_{cend} determinados por Souza et al. (2012) e os valores encontrados por Carvalho et al. (2006) se mostraram maiores em relação aos K_c determinados neste trabalho. Essa diferença está relacionada a maior quantidade de dias em com altas temperaturas, pois tiveram a semeadura antecipada fazendo com que o ciclo possuísse maior quantidade de dias com temperaturas mais elevadas em relação ao milho semeado em março. As altas temperaturas também justificam as diferenças entre os valores encontrados por Bastos et al. (2008), e o presente trabalho, de modo que o estudo conduzido nos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, trata-se de milho verão, que em geral todos os dias do ciclo possuem temperaturas mais elevadas em relação ao milho safrinha.

Já no litoral cearense, utilizando o método do balanço hídrico e um sistema de irrigação por gotejamento, Bezerra e Oliveira (1999) encontraram valores de K_c de 0,73, 1,11, 0,95 e 0,64, para as fases I, II, III e IV, respectivamente. Esses dados mostram valores mais elevados nas fases inicial e final em relação a este trabalho. Por outro lado, na fase de maior demanda atmosférica a região cearense apresentou demanda hídrica menor, porém muito próxima à demanda da região sul mato-grossense.

Verifica-se grande diferença nos valores de K_c do milho determinados em diversas regiões. Na maioria dos casos estes diferenciam-se também dos valores fornecidos pela FAO, o que pode vir a ocasionar problemas em aplicações relacionadas à irrigação e zoneamento agrícola, dentre outras possíveis. No caso deste trabalho, percebe-se que há uma subestimativa nos valores fornecidos pela FAO, na fase inicial e final. É importante ressaltar que o déficit hídrico de uma cultura no início do ciclo pode causar sérios danos na produção.

4.4 Evaporação, Transpiração e coeficientes de cultivo dual (K_e e K_{cb})

4.4.1 Evaporação e Transpiração

Quando o suprimento de água no solo é suficiente para atender as necessidades da cultura, a proporção de E do solo e T das plantas diante da ET_c passam a ser fatores dependentes do IAF e da umidade da superfície do solo (Figura 20).

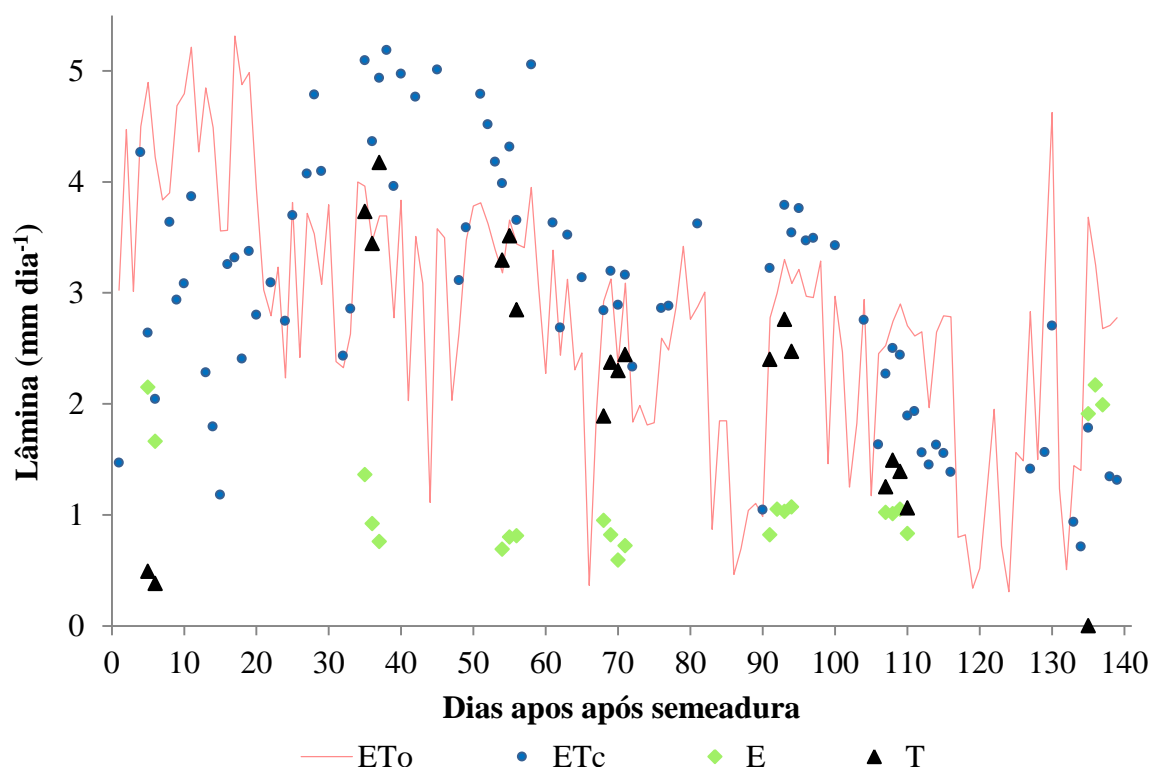


Figura 20. Evapotranspiração de referência (ET_o), evapotranspiração da cultura (ET_c), evaporação (E) e transpiração (T) (todos em mm dia^{-1}), medidos no período de 140 dias de ciclo do milho safrinha para a região de Dourados - MS.

No início do ciclo o IAF é nulo ou pequeno (Figura 16), nesta ocasião tem-se a E do solo representando quase que por completo a ET_c . Nota-se ainda que, a amplitude dos valores de E no início do ciclo, são maiores em relação às outras fases, isso ocorre porque com pouca ou nenhuma área foliar, a superfície do solo encontra-se completamente exposta, sem a presença do sobreamento das plantas, logo quando ocorre o umedecimento da superfície do solo, as taxas de E se elevam muito. Considerando a ausência de chuvas e irrigações após esse umedecimento, a umidade superficial do solo diminui e, como consequência, reduz-se as altas taxas de E, explicando essa amplitude entre os valores diários.

Por outro lado, na fase de desenvolvimento e fase intermediária quando o IAF é máximo a T passa a ser a principal responsável pela ET_c . Além de que o fato da superfície do solo úmida não causa picos nos valores de T, como no caso da E.

No final do ciclo, a E passa a ser dominante novamente, porém não ocorre grande amplitude nos valores diários medidos como no início no ciclo. Isso acontece devido ao fato de que mesmo em senescência a planta ainda apresenta-se presente, fazendo o sobreamento parcial do solo e evitando essa amplitude entre os valores medidos.

Para a mensuração da E e T separadamente é necessário que haja ausência de irrigações e chuvas durante o período. A série 1 (Figura 21) apresenta apenas dois dias de medições devido a ocorrência de chuva no terceiro dia. A série 1 foi realizada no início do ciclo, momento onde o IAF era praticamente zero. Nesse período, a demanda da cultura é menor em relação a demanda atmosférica, ou seja, ET_0 é maior em relação a ET_c . Neste momento, a E representou cerca de 82% da ET_c . Verifica-se ainda que o valor de E do segundo dia de medição reduziu cerca de 25% em relação ao primeiro dia. A elevada taxa de E do solo ocorreu porque, além do baixo IAF, no dia 8 de março de 2015 ocorreu uma chuva de, aproximadamente, 44 mm, logo, com a superfície úmida e a ausência de sombreamento, essa combinação de fatores fez com a taxa de E fosse potencializada.

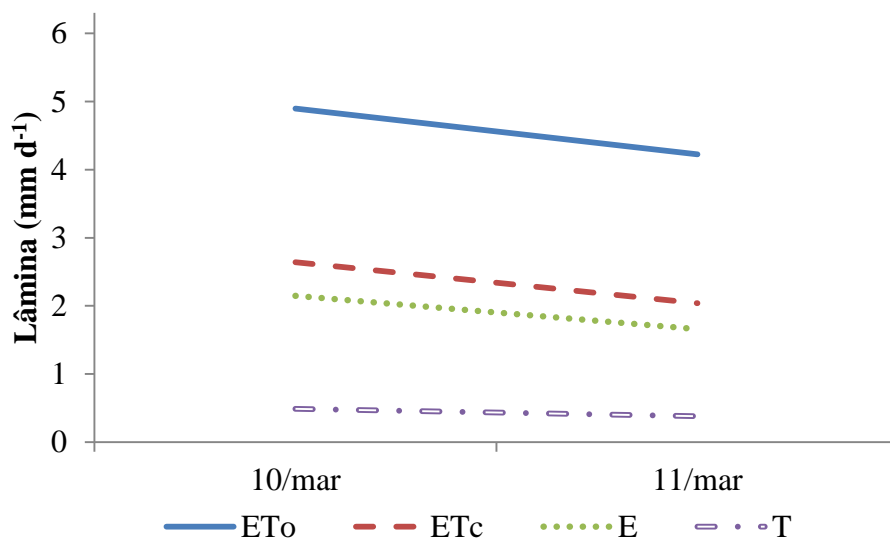


Figura 21. Evapotranspiração de referência (ET_0), evapotranspiração da cultura (ET_c), evaporação (E) e transpiração (T) (todos em mm d^{-1}), do milho safrinha medidos com lisímetro de pesagem e microlisímetros nos dias 10 e 11 de março de 2015 (Série 1).

A série 2 conta com três medições (Figura 22), pois necessitou-se realizar irrigação, impedindo que a série fosse continuada. Na ocasião da segunda série o IAF já era alto (Figura 16), o que caracteriza a inversão da contribuição entre E e T na ET_c . Nesse momento a T já era o principal fator responsável pela elevada demanda hídrica da cultura do milho safrinha, onde a ET_c passou a ser maior em relação a demanda atmosférica, fato que configura valores de K_c superiores à 1. Em média nos três dias de avaliação a T representou cerca de 78% da ET_c . Verifica-se ainda que a queda dos valores de E do solo de um dia para o outro não é tão acentuada como em fases de pouca área foliar, o que é justificado pelo sombreamento do solo

pelo dossel da cultura que limita o acesso de energia radiante para evaporar a água presente na superfície do solo, já que esta é interceptada pelo dossel vegetativo e resulta em T.

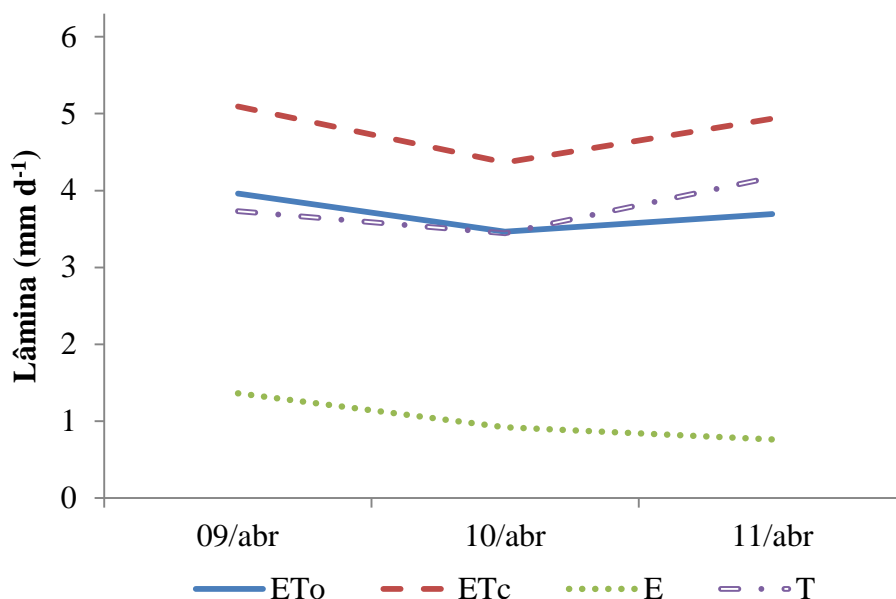


Figura 22. Evapotranspiração de referência (ET_0), evapotranspiração da cultura (ET_c), evaporação (E) e transpiração (T) (todos em mm d^{-1}), do milho safrinha medidos com lisímetro de pesagem e microlisímetros no período de 09 a 11 de abril de 2015 (Série 2).

4.5 Coeficiente de evaporação do solo e Coeficiente de cultivo basal

Observa-se que a curva do K_e possui formato semelhante à curva do K_c , porém em ordem inversa, diferentemente do K_{cb} que segue a mesma ordem do K_c . O fato é justificado pelo IAF, ou seja, no início do ciclo quando o solo encontra-se com pouca cobertura vegetal a evaporação é a principal responsável pela ET_c , logo o K_e torna o principal responsável do K_c e possui valores muito próximos ao do K_c . A medida que a planta se desenvolve e aumenta o IAF, o K_e diminui e o K_{cb} aumenta, tornando-se o principal responsável pelo K_c . Quando a planta começa a senescência, os valores de K_e voltam a aumentar, e os valores de K_{cb} decrescem bruscamente (Figura 23).

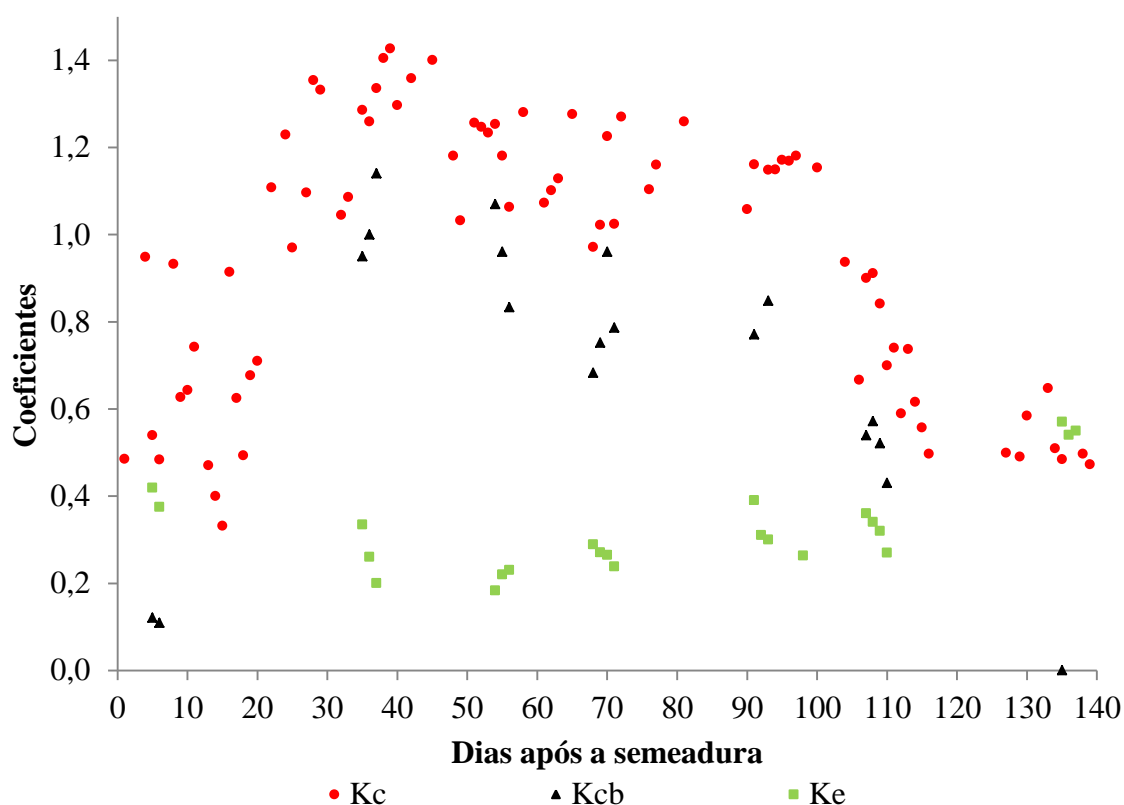


Figura 23. Coeficientes de cultivo simples (K_c), coeficiente de evaporação (K_e) e coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) do milho safrinha.

Assim como os valores de K_c , os valores de K_e medidos com os ML também mostraram-se diferentes em relação aos valores estabelecidos pelo Boletim 56 da FAO (Tabela 6). Os valores medidos foram maiores em todas as ocasiões. Nas fases inicial e final os valores medidos mostraram-se, em média, 65% maiores em relação aos valores da FAO. Contudo a maior diferença ocorreu com o valor de $K_{e\text{ mid}}$, onde o valor medido apresentou-se 85% maior em relação ao recomendado pela FAO.

Tabela 6. Coeficientes de evaporação do solo (K_e) determinado pelos ML (Medido) e modelado de acordo com o Boletim 56 da FAO (FAO)

Recomendação	K_e	
	Medido	FAO
$K_{e\text{ ini}}$	0,42	0,15
$K_{e\text{ mid}}$	0,27	0,05
$K_{e\text{ end}}$	0,55	0,2

Nota-se que os valores medidos para todos os dias de ciclo são maiores em relação aos valores da FAO durante todo o ciclo. A maior amplitude entre os valores de K_{emid} está relacionado a duração das fases, de modo que o K_{emid} da FAO se inicia mais tarde e tem duração menor, ou seja, a antecipação das fases nos valores medidos fez com que os valores de K_{emid} tivessem mais que o dobro de dias de duração em relação a duração da fase da FAO, além de que a antecipação dessa fase fez com que a fase iniciasse em dias mais quentes, contribuindo com valores mais elevados de E do solo.

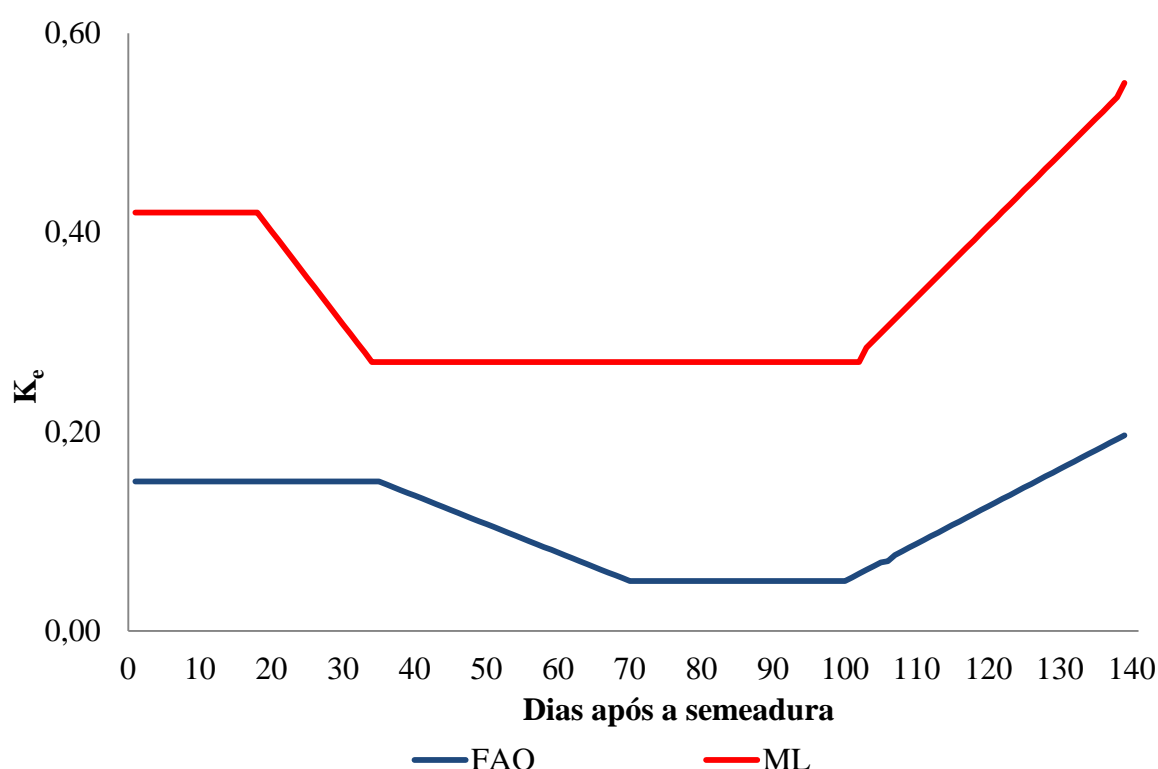


Figura 24. Coeficiente de evaporação do solo (K_e) do milho safrinha modelado com os valores obtidos pelos ML (ML) e com os valores do Boletim 56 da FAO (FAO).

Os valores de K_e apresentam-se maiores nas fases inicial e final, onde a E é dominante pelo processo da ET_c . Já na fase de desenvolvimento onde a T passa a ser a principal responsável os valores de K_e apresentaram-se menores, representando cerca 20% apenas dos valores de K_c . Os valores de K_e variaram de 0,18 a 0,6 durante o ciclo.

Vieira (2013), trabalhando com lisímetros e microlisímetros para a cultura do trigo, na Região Noroeste do Paraná, também relata comportamento semelhante de evaporação do

solo, ou seja, valores elevados inicialmente, decrescendo com o desenvolvimento da cultura e aumentando novamente com sua senescência.

Os valores de K_{cb} mostraram-se menores em relação aos valores padronizados pela FAO, porém muito próximos (Tabela 7).

Tabela 7. Coeficientes de cultivo basal (K_{cb}) determinado pela diferença entre o K_c do lisímetro e K_e dos ML (Medido) e modelado de acordo com o Boletim 56 da FAO (FAO)

Recomendação	K_{cb}	
	Medido	FAO
$K_{cb\ ini}$	0,1	0,15
$K_{cb\ mid}$	0,9	1,15
$K_{cb\ end}$	0,1	0,15

Observa-se a tendência de valores baixos inicialmente, tendo um ligeiro aumento, permanecendo com valores altos durante todo o período de maior demanda hídrica da cultura. Conforme as plantas envelheceram e entraram em senescência os valores do coeficiente de cultura basal também decresceram, chegando a zero no mesmo período em que o IAF foi zero (Figura 25).

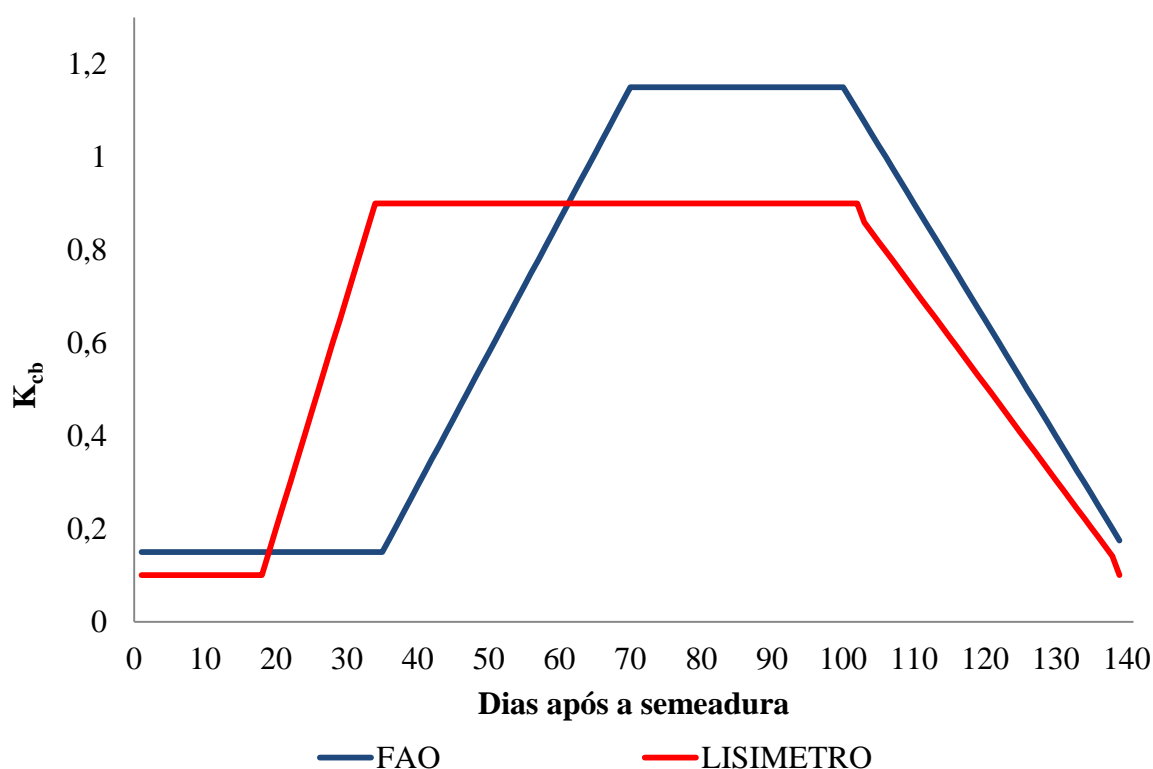


Figura 25 . Coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) do milho safrinha modelado com os valores obtidos pelo lisímetro e ML (ML) e com os valores do Boletim 56 da FAO (FAO).

Os valores medidos não se apresentaram maiores do que os valores do Boletim 56 da FAO. Observa-se que o patamar dos valores mais elevados começaram mais cedo para os valores medidos porém decrescem no mesmo período que os valores modelados.

Na planície norte da China, Liu; Luo (2010), avaliaram durante seis anos os valores de K_{cb} para o milho verão, onde obtiveram a variação de 1,1 e 1,6 para a fase intermediária e para a fase final a variação foi de 0,45 e 0,6. Esses valores foram ligeiramente superiores aos obtidos no presente estudo para a região de Dourados onde teve-se K_{cb} de 0,1 para a fase final e 1,1 para a fase intermediária, isso demonstra uma maior demanda da cultura para a região Chinesa, pois trata-se do milho verão, onde tem-se maior quantidade de dias com temperaturas mais elevadas em relação ao milho cultivado na safrinha.

4.5.1 Produtividade

A produtividade do lisímetro foi de 7698,3 Kg ha⁻¹, um pouco abaixo da produtividade média da área experimental externa ao lisímetro que foi de 9826,2 Kg ha⁻¹

(Figura 26). Todavia, em ambos os casos, a produção é considerada elevada para a região em estudo, onde de acordo com a CONAB (2015) a média de produtividade de milho safrinha para o Estado do Mato Grosso do Sul é de 4500 Kg ha⁻¹. O ocorrido pode ser justificado diante do manejo de irrigação durante a safra, que manteve o solo sempre em ótimas condições hídricas.

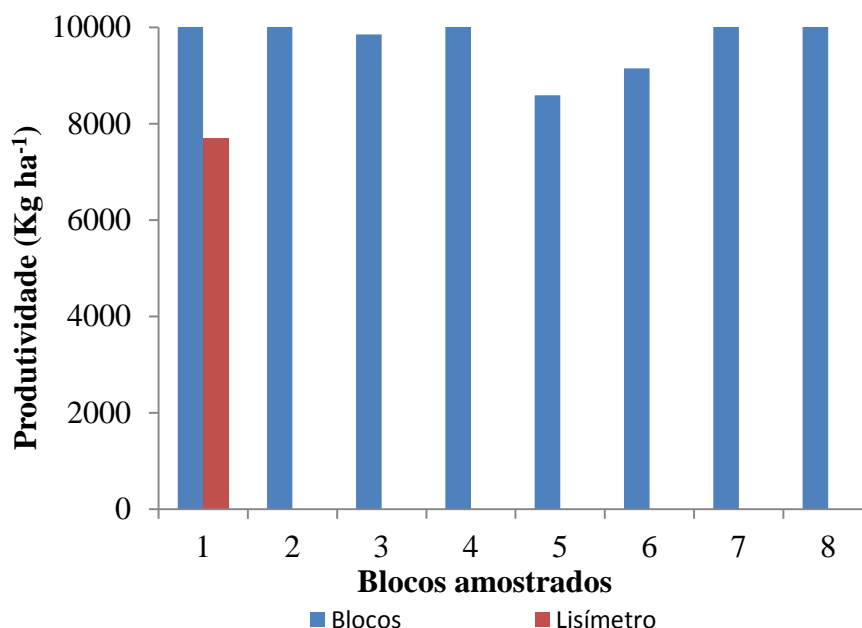


Figura 26. Produtividade do milho safrinha para as condições do estudo na área externa ao lisímetro de pesagem (Blocos) e na área interna do lisímetro (Lisímetro).

4.5.2 Determinação do K_c , K_e e K_{cb} utilizando do IAF

Sabe-se que o K_c , K_e e K_{cb} são coeficientes diretamente relacionados ao IAF. Conhecendo-se o IAF medido em campo e, utilizando-se dessa relação estabelecida no presente trabalho, é possível aos produtores determinarem com boa acurácia os valores dos coeficientes (K_c , K_e e K_{cb}) durante toda a safra. Com essa definição, dada a facilidade na determinação dos valores de IAF (item 3.12). O intuito de otimizar o uso da água na agricultura irrigada e facilitar o manejo da irrigação para os produtores estabeleceu-se uma relação entre IAF e K_c (Figura 27), K_e (Figura 28) e K_{cb} (Figura 29).

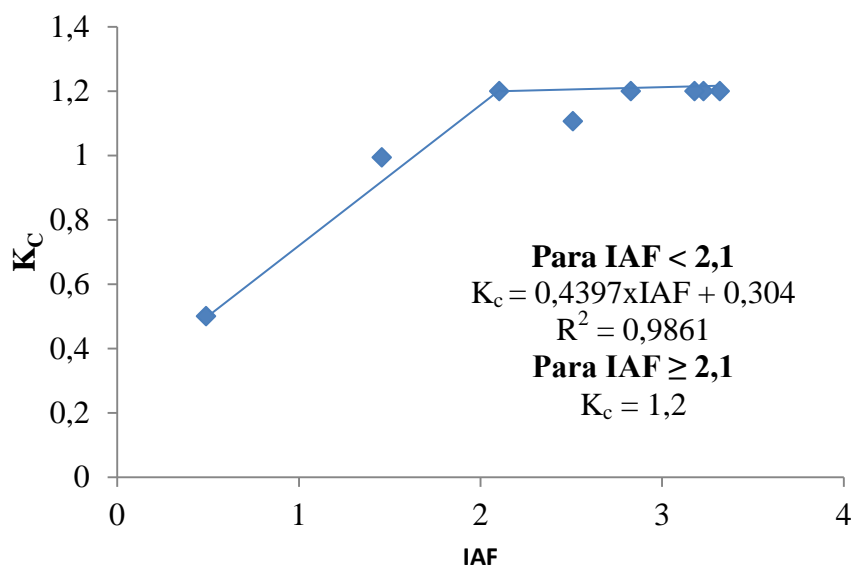


Figura 27. Relação entre o coeficiente de cultivo (K_c) do milho safrinha para a região de Dourados - MS e o índice de área foliar (IAF).

O K_c do milho safrinha para a região de Dourados possui um aumento linear com o aumento do IAF. A relação pode ser explicada com a equação apresentada na figura 33. Quando o IAF atinge o valor de 2,1 verifica-se a formação de um platô, representando o máximo valor de K_c encontrado nesse estudo, ou seja, para valores de IAF igual ou maior a 2,1 o valor de K_c será 1,2.

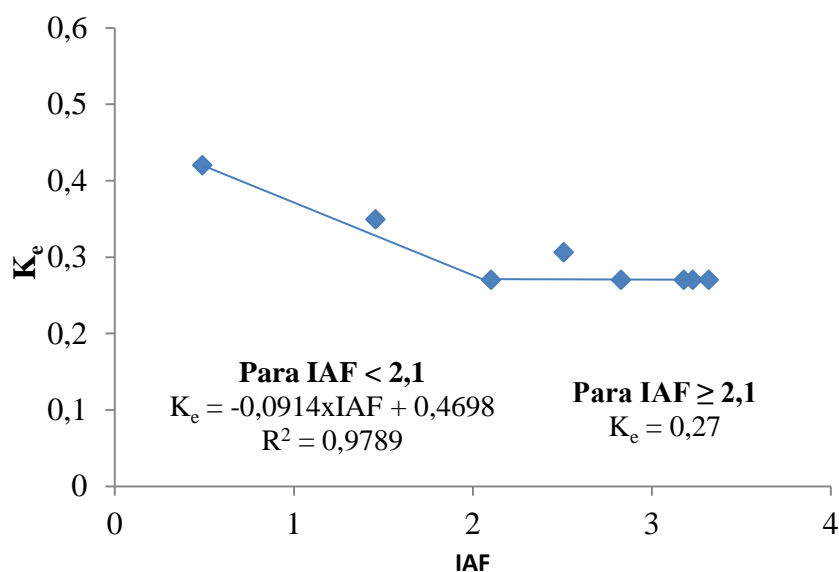


Figura 28. Relação entre o coeficiente de evaporação do solo (K_e) para o milho safrinha cultivado na região de Dourados - MS e o índice de área foliar (IAF).

A relação do K_e é semelhante ao K_c , porém em ordem inversa que é representado pelo valor negativo do coeficiente linear, de modo que conforme aumenta o IAF o valor de K_e decresce. Observa-se ainda o mesmo platô, porém também em ordem inversa, ou seja, quando o IAF atinge o valor igual ou maior que 2,1 têm-se o menor valor de K_e que é igual a 0,27.

Já o K_{cb} segue a mesma ordem linear do K_c . Também possui um platô, onde é representado pelo valor de 0,9 na ocasião de IAF igual ou maior a 2,1.

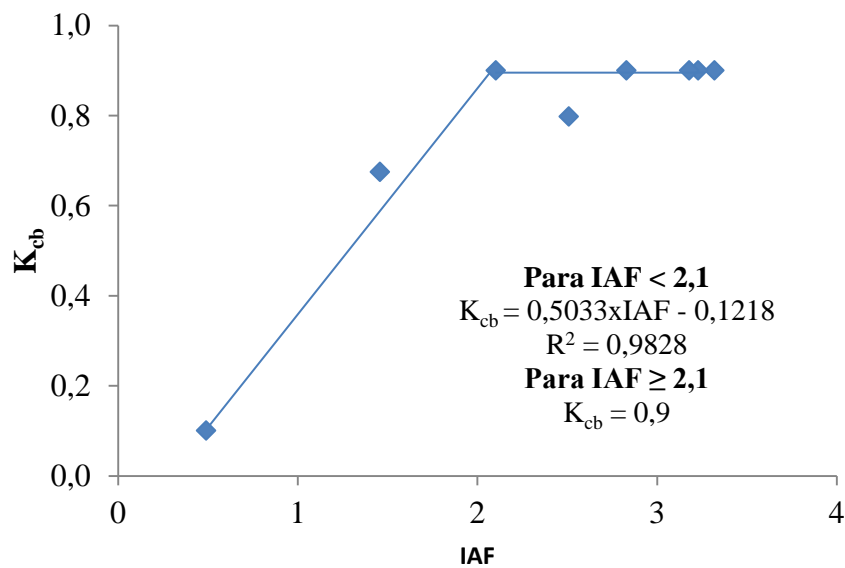


Figura 29. Relação entre o coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) do milho safrinha para a região de Dourados - MS e o índice de área foliar (IAF).

5 CONCLUSÕES

Os valores recomendados de K_c neste trabalho são: $K_{c\text{ ini}}$ de 0,5; $K_{c\text{ mid}}$ de 1,2; $K_{c\text{ end}}$ de 0,47, com durações das fases inicial, crescimento, intermediária e final de 18, 16, 67 e 39, dias respectivamente.

Da mesma forma, os valores recomendados de K_e são: $K_{e\text{ ini}}$ de 0,42; $K_{e\text{ mid}}$ de 0,27; $K_{e\text{ end}}$ de 0,55. Quanto aos valores de K_{cb} recomendados estes são: $K_{cb\text{ ini}}$ de 0,1; $K_{cb\text{ mid}}$ de 0,9; $K_{cb\text{ end}}$ de 0,1.

Os valores de ET_c do milho safrinha cultivado na região de Dourados-MS mais elevados, ocorreram de 28 a 97 dias após a semeadura, apresentando consumo total de 362,5 mm durante o ciclo de 140 dias.

6 REFERÊNCIAS

- ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO 1982. 68 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 39).
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- AMARAL, J. A. M.; MOTCHI, E. P.; OLIVEIRA, H.; CARVALHO FILHO, A.; NAIME, U. J.; SANTOS, R. D. **Levantamento semidetalhado dos solos do campo experimental de Dourados, da Embrapa Agropecuária Oeste, município de Dourados, MS**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 68 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 22; Embrapa Solos. Documentos, 15).
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Measurement and reporting practices for automatic agricultural weather stations**. St. Joseph, 2004. 21 p. (Engineering Practices, 505)
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES INSTITUTE. **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**. Reston: ASCE, 2005. 216 p.
- ANA – Agência Nacional das Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2010**. Brasília – DF. 78p. 2010.
- BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J; MENDES, A. G.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SANTOS, F. J. S. Coeficiente de cultivo do milho nos Tabuleiros Litorâneos do Piauí. In: **Congresso Nacional de Milho e Sorgo**, 2008, Londrina-PR. XXVII Congresso Nacional de Milho e Sorgo. Londrina-PR : Embrapa Milho e Sorgo/Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2008. p. 1-5.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 7ed. Viçosa. Editora UFV, 2005. 611 p.
- BERGAMASCHI, H; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 84 p., 2014.
- BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. Milho. In: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. p. 237 – 260.
- BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H. Ecofisiologia do milho. In: **Congresso Nacional de Milho e Sorgo**, 24., 2002, Florianópolis, SC. Anais... Florianópolis, SC: ABMS/EMBRAPA/EPAGRI, 2002. (CD-ROM). :

BEZERRA, F. M. L.; OLIVEIRA, C. H. C. Evapotranspiração máxima e coeficientes de cultura para o milho em Fortaleza, CE. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n.1, p. 8-17, 1999.

BRANDÃO, D. **Disponibilidade hídrica no solo, fotossíntese e evapotranspiração em plantas de feijoeiro**. 2012. Maringá. 43p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Agrárias. Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

CAMPBELL, G. S., NORMAN, J. M. **An Introduction to environmental biosphysics**, 2.ed. New York: Springer, 1998. 286p.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. D.; FOLEGATTI, M. V.; COSTA, J. R.; CRUZ, F. A. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira Agrometeorologia**, v.14, p.97-105, 2006.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento safra brasileira grãos**, v. 2 - Safra 2014/15, n. 12 – Décimo segundo levantamento, Brasília, p. 1-134, set. 2015.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALVARENY, R. C.; et al. Manejo da cultura do milho. Circular Técnica. Sete Lagoas. 2006. ISSN 1679-1150.

FASSIO, A.; CARRIQUIRY, A. I.; TOJO, C.; ROMERO, R. **Maiz: aspectos sobre fenologia**. Série técnica 101. Montevideo. 1998.

FANCELLI, Antônio Luiz. Fisiologia, nutrição e adubação do milho para alto rendimento. Piracicaba, São Paulo. Departamento de Produção Vegetal. São Paulo: ESALQ/USP, 2003.

FARAHANI, H. J.; HOWELL, T. A.; SHUTTLEWORTH, W. J.; BAUSCH, W. C. Evapotranspiration: progress in measurement and modeling in agriculture. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n. 5, p. 1627-1638, 2007.

FIGUEIRA, T R S. **A origem do milho: a identificação de *saccharum* como um de seus prováveis parentais**. Campinas. 2007. 102 p. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.

FLEXAS, J. et al. Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress. **Physiologia Plantarum**, v. 127, p. 343-352, 2006.

FLORES, A. J. M., SANTOS, P. R., RICHETTI, A., & CECCON, G. (2014, January). **Sistemas de produção de milho safrinha em mato grosso do sul**, EM 2013. In *Embrapa Agropecuária Oeste-Artigo em anais de congresso*. In: SEMINÁRIO NACIONAL [DE] MILHO SAFRINHA, 12., 2013, Dourados. Estabilidade e produtividade: anais. Brasília, DF: Embrapa; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2013.

FLUMIGNAN, D L. **Evapotranspiração, seus componentes e coeficientes de cultivo simples e dual de cafeeiros**. Londrina. 2008. 90p. Dissertação (Mestrado em Agronomia).

Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós Graduação em Agronomia.

FLUMIGNAN, D L. **Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.)** . Piracicaba. 2011. 200 p. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz.

FLUMIGNAN, D L. FARIA R T. LENA B P. **Test of a microlysimeter for measurement of soil evaporation**. Revista Engenharia Agrícola. Jaboticabal. V.32. n 1, P 80-90. 2012.

FREITAS, W. da, S.; RAMOS, M. M.; COSTA, S. L. da. Demanda de irrigação da cultura da banana na bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.12, n.4, p.343–349, 2008.

GARCIA, J. C.; MATTOSO, M. J.; DUARTE, J. O.; CRUZ, J. C.; PADRÃO, G. A. Aspectos econômicos da produção e utilização do milho. In: CRUZ, J. C.; KARAM, D.; MONTEIRO, M. A. R.; MAGALHÃES, P. C. **A cultura do milho**. Sete Lagoas. 2008. p 21 – 45. Cap 1.

GUIA CLIMA. **Sistema de monitoramento agroclimático de Mato Grosso do Sul**. Disponível em: <<http://www.cpao.embrapa.br/clima/>>. Acesso em: 08 nov. 2015.

HATTERSLEY, P.W. Characterization of C4 type leaf anatomy in grasses (Poaceae). Mesophyll: bundles sheath area ratios. **Annual of Botany**, Londres, v.53, n.2, p.163-179, 1984.

KANG, S.; GU, B.; DU, T.; Zhang, J. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. **Agricultural water management**, v. 59, n. 3, p. 239-254, 2003.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.

LEMON, E. R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madson, v.20, n.1, p. 120-125, 1956.

LENA, B. P. **Consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) irrigado e sem irrigação na fase de formação**. Piracicaba. 2013. 62 p. Dissertação de mestrado Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz.

LIU, Y; LUO, Y. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. **Agricultural Water Management**. v.97, n.1, p.31- 40, 2010.

LIU, C.; ZHANG, X.; ZHANG, Y. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. **Agricultural and Forest Meteorology**. p. 109 – 120. 2002.

LYRA, G. B.; et al. Modelo de crescimento logístico e exponencial para o milho BR106, e, três épocas de plantio. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**. V. 7, n. 3, p. 211 -230, 2008.

MACHADO, A. F. L.; et al. Eficiência fotossintética e uso da água em plantas de Eucalipto pulverizadas com glyphosate. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 28, n. 2, p. 319-327, 2010.

MAGALHÃES, P. C. Aspectos fisiológicos da cultura do milho irrigado. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. D.; COUTO, L. **A cultura do milho irrigado**. Brasília. 2003. p. 43-65.

MAGALHÃES, P. C. et al. **Fisiologia do milho**. Sete Lagoas:EMBRAPA -CNPMS, 2002. (Circular Técnica, 22).

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. Fisiologia da produção. In: CRUZ, J. C.; KARAM, D.; MONTEIRO, M. A. R.; MAGALHÃES, P. C. **A cultura do milho**. Sete Lagoas. 2008. 517 p. Cap 3.

MANGELSDORF, Paul C. The origin of corn. **Scientific American**, v. 255, n. 2, p. 80-86, 1986.

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Milho**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/milho>> Acesso em 08 nov de 2015

MEDEIROS; S. S.; SOARES, A. A.; FERREIRA, P. A.; NEVES, J. C. L.; MATOS, A. T.; SOUZA, J. A. A. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: estudo das alterações químicas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, P.603-612, 2005.

MESSINGER, S. M. et al. Evidence for involvement of photosynthetic processes in the stomatal response to CO₂. **Plant Physiology**, v.140, n.2, p.771-778, 2006.

MÜLLER, A. G.; BERGAMASCHI, H. Eficiências de interceptação, absorção e de uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.13, n.1, p. 27-33, 2005.

PAES, M. C. D. Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho. In: CRUZ, J. C.; KARAM, D.; MONTEIRO, M. A. R.; MAGALHÃES, P. C. **A cultura do milho**. Sete Lagoas. 2008. P 47 – 60. Cap 2.

PAIVA, A. S.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D.; TURCO J. E. P.; Condutância Estomática de Feijoeiro Submetido a Diferentes Regimes de Irrigação. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.1, p.161-169, 2005.

PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Construction, Installation, and Performance of Two Repacked Weighing Lysimeters. **Irrigation Science**, v. 26, n. 2, p. 191-202, 2008.

PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Produção de milho em sistemas irrigados. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P. E. D.; COUTO, L. **A cultura do milho irrigado**. Brasília. 2003. p. 205-238.

PICCINNI, G.; KO, J.; MAREK, T.; HOWELL, T. Determination of growth-stage-specific crop coefficients (K_c) of maize and sorghum. **Agricultural Water Management**. Issue. V.96. p. 1698 – 1704. 2009.

QUAGLIA, L. **Calibração de um lisímetro de pesagem para monitoramento da evaporação do solo sem cobertura vegetal**. 104 p. Dissertação de Mestrado. ESALQ/USP. Piracicaba. 2005.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J. & BENSON, G.O. How a corn plant develops. **Ames, Iowa State University of Science and Technology**, 1993. 26p. (Special Report, 48).

RITCHIE, J. T. Model to predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resource Research**, Canberra, v. 8, no. 5, p. 1204-1213, 1972.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a corn plant develops. **Special Bulletin**, Iowa, n. 48, 1993.

SANGOI, L.; SCHMITT, A.; ZANIN, C.G. Área foliar e rendimento de grãos de híbridos de milho em diferentes populações de planta. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.6, p.263-271, 2007.

SANTOS, W. O.; et al. Coeficientes de cultivo e necessidades hídricas da cultura do milho verde nas condições do semiárido brasileiro. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n.4, p. 559-572, 2014.

SMITH, D.M., ALLEN, S.J., Measurement of sap flow in plant stems. **J. Exp. Bot.** 1833 – 1844 p. 1996.

SOUZA, A. P.; LIMA, M. E.; CARVALHO, D. F. Evapotranspiração e coeficientes de cultura do milho em monocultivo e em consórcio com a mucuna cinza, usando lisímetros de pesagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 1, p. 142-149, 2012.

STICKLER, F.C.; WEARDEN, S. & PAULI, A.W. Leaf area determination in grain sorghum. **Agronomy Journal**, 53:187-188, 1961.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

VIEIRA, P V D. **Determinação do coeficiente cultural (K_c) do trigo (*Triticum aestivum*) e do coeficiente de evaporação da água do solo (K_e)**. 64 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá – UEM. Maringá. 2013.

WALKER, G. K. Measurement of evaporation from soil beneath crop canopies. **Canadian Journal of Soil Science**. Ottawa, V. 63, p 137-141, 1983.

WOLSCHICK, D., CARLESSO, R., PETRY, M. T., & JADOSKI, S. O. Nitrogen application on maize cultivated under no-tillage system in a year with normal precipitation and with "El-Niño". **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 461-468, 2003.